

ヒト前頭洞の形態計測及び脳頭蓋との相関分析

— モアレ縞写真とエックス線写真の画像情報処理と
データ解析におけるマイクロコンピュータの応用 —

小野寺 哲

札幌医科大学解剖学第2講座 (主任 三橋公平教授)

A Metrical Study of the Human Frontal Sinuses and Correlation Analysis with the Cerebral Cranium

— Computer-aided Examinations with Moiré Contourographs,
Radiographs and Multivariate Analysis —

Satoru ONODERA

Department of Anatomy (Section 2), Sapporo Medical College
(Chief : Prof. K. Mitsuhashi)

The frontal sinuses of 75 Japanese skulls (male: 55, female: 20) were examined radiographically, and their variations in the size were statistically studied. In order to explain the cause of variation, particularly between individuals, radiological craniometry was adopted and relationship between sinus size and cranial shape was documented statistically. Moreover, in order to examine the relation between bilateral differences in the sinuses and the asymmetry of the frontal bone, new computer-aided techniques were devised to produce a superimposed image of the X-ray tracings of the sinuses and moiré contour lines on the surface of the frontal squama. In this study, nearly all of the measuring techniques and statistical procedures, with the exception of those after Martin for cranial bone weight, maximum cranial length and breadth, and minimum and maximum frontal breadth, were aided by the microcomputer programings of the author.

A. Results of metrical examinations were as follows.

- (1) The frontal sinuses measurements, namely height, breadth, depth, and the square root of the surface area, were found to conform to a normal distribution curve.
- (2) Applications of t-testing concerned with the differences in mean values of sinus measurements yielded the following results:
 - a. Left sinuses were significantly bigger than those of the right.
 - b. Male sinuses showed a tendency to be bigger than those of the females. However, statistically, there was no significant sex difference.
 - c. There was no significant difference with age.
 - d. Metopic skulls had significantly lower mean values than the others. However, both univariate and multivariate studies, to judge whether the sinus size in metopism was considered to be within normal limits, suggested that metopic skulls do not always show an abnormally small size.
- (3) By principal component analysis, three important features of the frontal sinuses were extracted.
 - a. The 1st principal component was interpreted as the general size factor of the frontal sinuses as a whole. It was noted that the size of the frontal sinuses was characterized by individual variations.
 - b. The 2nd principal component stands for the degree of bilateral asymmetry of the sinuses.
 - c. The 3rd principal component implies the degree of sinus depth.

- (4) A statistically significant correlation was found between “the size” of the frontal sinuses and “the shape” of the cerebral cranium.
 - a. It was statistically documented that information on sinus size could be estimated by geometrical data on the cranial bone, employing canonical correlation analysis.
 - b. Above all, it was anthropometrically noted that inclinations of the frontal bone and flexion of the sphenoidal bone were inversely proportional to the frontal sinus size. Moreover, frontal and sphenoidal bone thickness was directly proportional to the sinus size.
 - c. The above-mentioned relationship to metrical traits of the cerebral cranium was unaffected by sex, age, and the existence of metopism.
 - (5) The superimposed images of X-ray tracings and moiré contour lines were useful objectively and quantitatively to describe the morphological relationship between frontal squama and sinuses.
 - a. No relationship between the degree of sinus development and the surface form of the frontal bone, namely the arcus superciliaris and glabella region, was objectively proved.
 - b. The surface form of the frontal squama seemed to be rather symmetric in contrast to the considerable difference between the right and the left sinuses.
- B. A bibliographical discussion leads to the following conclusions:
- (1) It was suggested that the morphologically wide variations of the frontal sinus in man are closely associated with the process of human evolution.
 - (2) Biomechanical interpretation seemed to explain the relationship between sinus size and cranial shape.
 - (3) The physiological role of the frontal sinuses, as cavities in the frontal bone, is presumably to act as an effective internal architecture in resisting biomechanical actions of the frontal bone, such as forces derived from the masticatory apparatus, head weight, etc.

(Received December 15, 1983 and accepted January 30, 1984)

Key words: Frontal sinus, Radiological craniometry, Moiré topography, Multivariate analysis, Microcomputer

1 緒 言

前頭洞は前頭骨の外板と内板の間に存在する含気腔であり、ヒトでは上顎洞、篩骨洞、蝶形骨洞とともに副鼻腔を形成している。各々の副鼻腔は小孔によって固有鼻腔と交通しており、鼻腔粘膜と基本的には同一の粘膜上皮が内腔を被っている。胎生期には、前頭洞は前頭骨内にはまだ認められず、上顎洞、篩骨洞、蝶形骨洞がわずかな空洞として認められるに過ぎない¹⁻³⁾。副鼻腔の発育の大部分は生後になされ、エックス線(以下X線)写真で前頭骨内に前頭洞の陰影を認めるのは、生後2~3歳になってからのことであり、思春期頃に急激な発育を示し、17~20歳までにはほとんど成人の大きさに達する^{4,5)}。そして副鼻腔一般についていえることであるが、殊に前頭洞の形態上の特徴は極めて変異が多いということである。すなわち比較解剖学的に見ても、

同じヒト上科のなかでも Gorilla, Chimpanzee の前頭洞はよく発達しているが、Orangutan, Gibbon では欠如するという⁶⁾。また、人種差、時代差、地域差、気候差⁷⁻¹¹⁾などのヒトの集団間での洞形態の変異も報告されている。

頭蓋に存在する含気腔は、すでに Galenus (130-201 A. D.) の時代から着目されている¹²⁾。しかし、Blanton and Biggs¹³⁾が“Eighteen hundred years of controversy: the paranasal sinuses”という題の総説論文を発表していることで象徴されるように、副鼻腔の生物学的存在意義は勿論のこと、含気化機構の問題について現在もお解明されていない。多くの研究がなされたにもかかわらず、一致した結論が得られない理由の一つに、副鼻腔の形態が極めて多様な変異を示し、これまでのどの説も形態上の変異を十分に説明できないということがある。

ヒトの前頭洞は殊に個体差が著しく、全身的にも局所的にも特に病的状態が存在しないにもかかわらず、前頭洞の完全に欠如した個体から、前頭鱗の大部分が含気化した個体まで大きな変異幅を示し、Schuller¹³⁾は個人識別に利用し得る形質であるとささ述べている。そして比較解剖学上や、人類集団間の変異と同様に、前頭洞の著しい個体間の変異が一体何を意味しているかは明らかにされておらず、わずかに頭蓋との形態上の相関を述べた論文が数編報告されているに過ぎない¹⁴⁻¹⁶⁾。最近の解剖学教科書でも、前頭洞の大きさは眉弓の発達程度などの前頭部の形状からは推定できないという記載を見るが、その根拠となる研究は少ない^{17,18)}。もし前頭洞形態の個体間の変異が頭蓋形態と無関係であるならば、含気化機構や生物学的存在意義を論ずる上で重大な意味があるし、逆に両者の間に関連があるとしたなら、頭蓋のどのような形態と相関を示すかが重要な問題となる。

そこで、集団内における前頭洞形態の変異の特徴と、洞と頭蓋の形態上の相関を明らかにする目的で形態計測を行なった。洞の諸計測値について、まず測定値の分布型の検討を行ない、次に個体差、左右差、男女差、年齢差、そして前頭縫合遺残例での洞形態の変異の特徴を分析した。さらに前頭洞と脳頭蓋との形態上の相関について、正準相関分析による検討を試みた。また、前頭鱗外面のモアレ縞写真撮影を行ない、眉間や眉弓の三次元形状と前頭洞形態との関係について検討した。

2 研究対象

研究材料は日本人晒浄頭蓋で、男性は17歳から83歳までの55例、女性は20歳から80歳までの20例である。

緒言で述べたように、前頭洞形態には時代差や地域差等の集団による差異が存在する可能性もある。そこで、生存年代や地域的にも、限局した条件の集団として、千葉大学所蔵の関東地方日本人骨を対象とした。

3 研究方法

前頭洞と頭蓋の形態計測は単純X線写真を用い、さらに前頭鱗外面のモアレ縞写真撮影を行ない、三次元形態の観察も行なった。また、X線像とモアレ縞画像の情報をデジタル化してマイクロコンピュータに入力し、各種の計測や統計処理を行った (Fig. 1)。

3.1 X線撮影法

前頭洞と頭蓋のX線撮影は、管球とフィルム面の距離を160 cmとし、被写体の固定は、著者が考案した頭

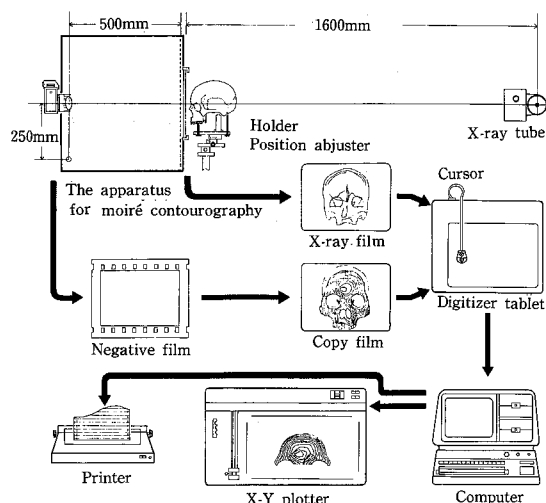


Fig. 1 Computer-aided morphological study procedures using X-ray photograph and moiré photograph.

蓋固定装置を用い、フィルム面に対する被写体の位置は観察目的に応じて設定した。この固定装置は、X線撮影とモアレ縞写真撮影の両者に対して使用可能な設計である。

3.1.1 前頭洞 X線撮影法

前頭洞の形態をX線写真で観察するには後前方向撮影が最適であり、著者もこれを採用したが、頭蓋の固定位置は研究者により、被写体が生体であるか晒浄骨であるかによっても異なる。著者は、単に洞正面X線像の計測だけではなく、モアレ縞写真との対比によって前頭鱗外面形状との関係を検討するために新たな撮影基準をきめた。まず頭蓋固定装置を用いて、両側のポリオンと左側オルビターレの三点による耳眼水平面に頭蓋を固定した。次に両側の fma (frontomale anterior: 頬骨前頭縫合の最前点¹⁹⁾)を含んで耳眼平面に垂直な面 (fma-plane, Fig. 2) とフィルム面が4 cmの間隔で平行となり、X線中心束がナジオンを通過するように設定した。この固定操作で三次元方向の移動調節を正確に行なうため、Vintec製のMicro Focus Adjusterと、スリック製カメラ用大型三脚を固定装置にとりつけた。

Fig. 1のごとく、実際の撮影装置はモアレ縞写真撮影を同時に行なうために、X線装置とモアレ撮影装置を対向する位置に設置し、X線中心束とモアレカメラの光軸が一致するように設計した。従って fma 平面の平行状態やナジオンの位置などの頭蓋の固定条件を、モ

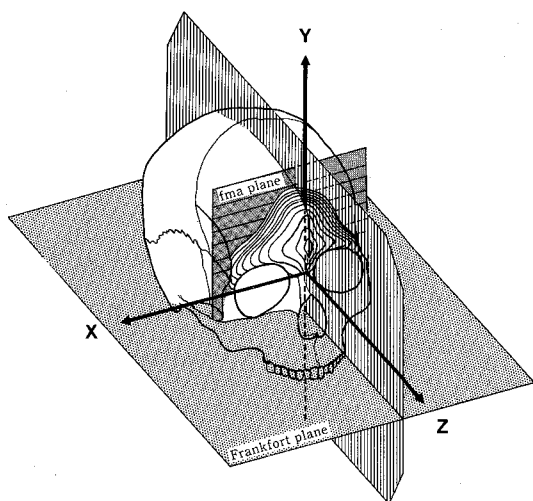


Fig. 2 Graphic representation of the rectangular coordinates and moiré contour lines on the frontal bone surface.

アレカメラによって確認できる利点がある。

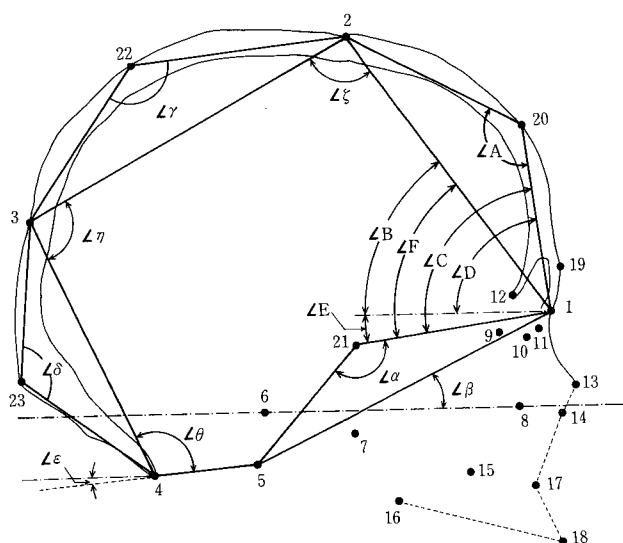
洞正面 X 線像の撮影後に固定装置を水平方向に 90° 回転させ、さらに正中矢状面 (Fig. 2 の YZ 平面) とフィルム面の距離を 100 mm とし、X 線中心束がナジオンを通過するように設定して側面像を撮影した。

3.1.2 頭蓋 X 線撮影法

X 線頭蓋計測は洞側面撮影と同じ X 線写真を用いて行った。X 線頭蓋計測には、主に人類学で使用する基準点が用いられている²⁰⁾。しかし人類学上の基準点は、頭蓋の実物計測のために定められており、X 線像上でこれらの点を正確に同定するのは困難な場合もある。そこで、人類学で使用する点と、本研究のために独自に設定した合計 23 点のうち 18 点を、小鉛球で標識した上で X 線側面撮影を行なった (Fig. 3)。

3.2 モアレ縞写真撮影法

前頭鱗外面の三次元形状と前頭洞形態との関係を観察するためにモアレ縞写真撮影を行なった。本法は光



No.	Abbr.	
1	n	: Nasion
2	b	: Bregma
3	l	: Lambda
4	o	: Opisthion
5	ba	: Basion
6	po	: Porion
7	ho	: Hormion
8	or	: Orbitale
9	fma	: Frontomale anterior
10	mf	: Maxillofrontale
11	sfn	: (1)
12	cc	: (2)
13	rhi	: Rhinion
14	snm	: (3)
15	zm	: Zygomaxillare
16	pm	: (4)
17	nas	: (5)
18	pr	: Prosthion
19	g	: (6)
20	m	: (7)
21	sphen	: Sphenoidale
22	m'	: (8)
23	m''	: (9)

Fig. 3 The 23 coordinate points on lateral X-ray tracing as numbered in the table on the right. For the 18 points (No. 1~18), a small lead shot was employed as a marker for X-ray tracing. See text and Table 1.

* : after Martin²¹⁾, ** : after Howells¹⁹⁾

- (1) the intersection of the naso-frontal suture and naso-maxillar suture.
- (2) the bottom of the foramen caecum.
- (3) the intersection of the naso-maxillar suture and pyriform aperture.
- (4) most inferior point of the border of the alveolar process of the maxillar bone and pyramidal process of the palatal bone.
- (5) lowest point of the pyriform aperture.
- (6) most prominent point of the frontal bone, not pertaining to the grabella.
- (7) highest point of the frontal arc above the chord.
- (8) highest point of the parietal arc above the chord.
- (9) highest point of the occipital arc above the chord.

学的手法によって物体表面に等高線を映したもので、その原理については既に多くの報告があるので²²⁻²⁵⁾、本論文では詳述せずに原理図と実際の写真を示す(Fig. 4, 5). 使用した撮影装置はFujinon FM3011で、実体格子照射型である²³⁾。頭蓋の固定は前頭洞撮影と同一とした。撮影中心はナジオンとし、fma平面とGrating(格子面)との距離(K)を30 mmとした。光源と格子面の距離(L)を500 mm, カメラの光軸と光源の距離(D)を250 mm, 格子間隔(S)を0.75 mmとして、等高線間隔(Hn)が、約1.5 mm(黒線と白線は0.75 mm)となる様に条件を設定した。フィルムはKodak Tri-X-panを用い、Pandolで4倍増感現像処理後、Fuji

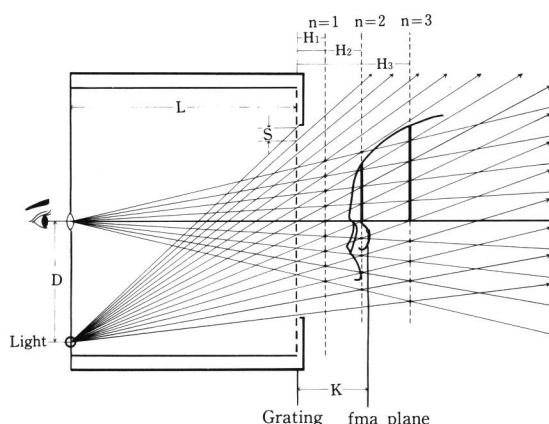


Fig. 4 Schematic representation of the principal of moiré topography. See text.

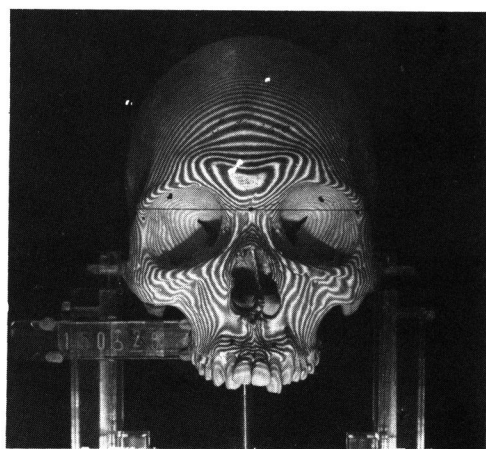
Note : $H_n = n \cdot S \cdot L / (D - n \cdot S)$

Gravure Film Type Nを使用して、左右のfma間隔が実大となる様に引き伸ばした。

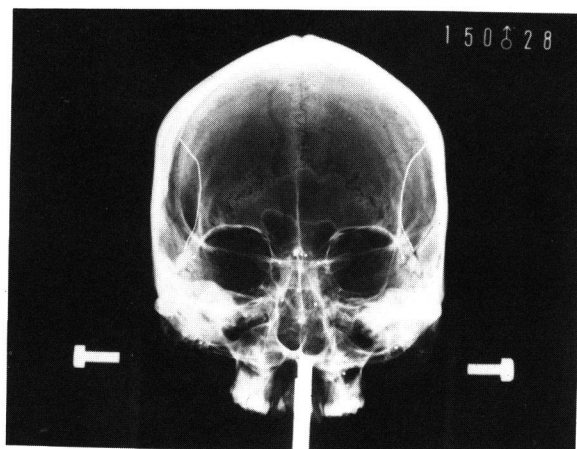
3.3 マイクロコンピュータによる処理

3.3.1 中心投影による歪みの補正方法

単純X線写真もモアレ縞写真も中心投影による歪みがある為に、形態計測を行なう場合には研究者によって種々の補正がなされている。2点間の距離あるいは面積を求める場合、X線断層写真では単純に拡大率によって補正できる。また角度の測定でも、中心投影の原点まわりの角度に対しては補正の必要がない。ところが単純X線写真やモアレ縞写真の場合には、三次元空間に存在する点を平面に中心投影しているから、2点間の距離でさえ単純な拡大率では補正できない。また任意の角度は単なる拡大率では補正する事ができない。中心投影の補正には、投影中心の位置と、投影面(フィルム面)と被写体の各点の距離(奥行)の情報が必要である。従って一方からの撮影だけで中心投影の補正を行なうのは不可能である。モアレ縞写真では、等高線による奥行の情報が記録されているので、光学的補正方法^{23b)}やコンピュータを利用したソフトウェアによる補正法²⁵⁾などが考えられている。そこで著者は、モアレ縞撮影とX線撮影の投影中心がフィルム上に映しだされる様に撮影を行なった。そしてデジタイザーを用いて、投影中心と、各標識点、頭蓋側面輪郭、前頭洞輪郭、モアレ縞をデジタル値化してマイクロコンピュータに入力し、ソフトウェアによって画像の歪みを補正した。



(a)



(b)

Fig. 5 A moiré photograph(a) and a radiograph(b). Specimen No. 150-M-28.

3.3.1.1 頭蓋側面 X 線像の補正

正中矢状面近傍に存在する標識点と、フィルムとの距離が 100 mm となるように撮影したので、この数値と投影中心をコンピュータに入力しておき、補正を行なった。しかし zm , fma , mf , or , por の各点は正中矢状面に存在しないので、あらかじめ各幅径を測定しておき、その 2 分の 1 の値を用いてフィルムと標識点間の距離を算出し、中心投影の補正を行なった。また洞側面 X 線像に対しては、正中矢状面近傍に存在する平均的前頭洞陰影像とみなして同様の補正を行なった。

3.3.1.2 前頭洞正面 X 線像の補正

洞辺縁輪郭線上の各点と、フィルム面との距離の情報を得ることは殆ど不可能である。そこで予備実験として、側面 X 線像の洞陰影の頂点とフィルムまでの距離を 75 例で検討してみると、20~60 mm の範囲に存在し、しかも多くの場合、 fma 平面はその中間に位置することがわかった。そこでフィルム面と fma 平面との距離を 40 mm と一定の条件で撮影し、その距離と中心投影の原点の座標値を用いて、洞輪郭線上のデジタル化された各点に対する補正を行なった。つまり、洞の辺縁がフィルム面から一律に 40 mm の距離に存在するとみなした上の近似的正投影像を得たわけである。この近似による相対誤差は±1%程度になり、直接計測の許容誤差としては特に問題にならないと考える。

3.3.1.3 モアレ画像の補正

モアレ画像にも、X 線像と同じく中心投影による歪みが存在する。但し、X 線像はフィルムから遠い物体ほど拡大され、モアレ画像では逆にフィルムに近い物体ほど拡大される。この歪みを補正するには、物体とフィルム間の距離がわかれば容易である。モアレ縞は等高線であり、Fig. 4 に示すごとく、縞次数 (N) が既知ならば図中の式を用いて格子面からの距離 (H_n) が算出可能である。本研究では格子面と fma の距離を 30 mm と一定にして撮影したので、前頭鱗外面に写し込まれたモアレ縞の次数を容易に決定できる。縞次数をコンピュータに入力しておき、デジタイザー上でモアレ縞をトレースして座標値化した各点を補正し、正投影像としてフロッピーディスクに記憶させた。

3.3.2 X 線像に対する自動計測

Fig. 6 に示す計測方法に従ってマイクロコンピュータのプログラムを作り、フロッピーディスクに記憶させた前頭洞正面と側面像の自動計測を行なった。

頭蓋側面 X 線像に対して、各標識点と頭蓋側面輪郭線の座標値をもとに、Table 1 に示す定義に従ったプログラムによる各種の脳頭蓋形態計測を行なった。

なお、Table 1 の x_{10} , x_{11} は前頭骨の下半部の傾斜角を測定したもので、以下の定義に従うプログラムを作成した。まず前頭弦の十等分点より前頭弧に下ろした垂線との交点を求める。次に前頭弧曲線上の交点のうちナジオン側の 5 点について、ナジオン・スフェノイド線および耳眼平面に対する傾斜角を各々測定し、その平均値を前頭下半部傾斜角とした。

3.3.3 モアレ縞画像に対する自動計測

等高線情報をもとに、前頭鱗外面の左右の歪みを検討する目的で以下の計測と出力を行なった。

まずナジオンを原点とした 5 mm 間隔の格子点を想定し、 fma 平面を基準面とした各格子点までの高さを、0.1 mm 単位で算出し、前頭鱗外面三次元形状の検討を行なった (Fig. 7)。また、前頭鱗外面正中部の最前方突出点は、コンピュータプログラムによりモアレ縞情報から自動的に判定し、ナジオンよりの垂直方向の高

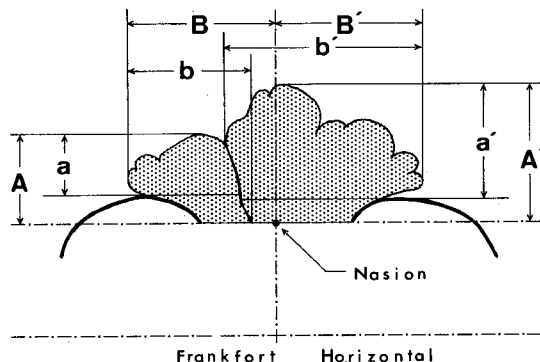


Fig. 6 Measurements taken on the postero-anterior projection of the radiograph. The dotted area represents the frontal sinus area defined as that part of the sinus which falls above the line drawn parallel to Frankfort Horizontal through the point nasion.

- FSHo : maximum height from the superior border of the orbit. (a & a')
- FSH : maximum height from the horizontal line through the nasion. (A & A')
- FSB : maximum breadth of each sinus. (b & b')
- FSBm : maximum breadth from the vertical line through the nasion. (B & B')
- FSA : area which falls above the horizontal line through the nasion.
- FSAo : area which falls above the tangential line to the superior border of each orbit.
- SQR. FSA & SQR. FSAo : square root of the area.
- FSXD : maximum depth of the sinus measured in the lateral projection of the radiograph.

Table 1 *Explanation of craniometry with computer-aided measuring. See Fig. 3 and Fig. 8.*

Var. & Abbr.*	Definitions and procedures of cranial measurements	
X ₁ FBCH	:	frontal chord after Martin (No. 29) ²¹⁾ .
X ₂ FBAC	:	frontal arc after Martin (No. 26) ²²⁾ .
X ₃ FBXB	:	maximum frontal breadth after Martin (No. 10) ²¹⁾ measured by manual methods.
X ₄ FBMB	:	minimum frontal breadth after Martin (No. 9) ²¹⁾ measured by manual methods.
X ₅ FBXT	:	maximum frontal bone thickness measured in the lateral X-ray projection.
X ₆ FBPH	:	vertical height of the most prominent point(g) from the nasion measured in the moiré contourograph.
X ₇ FBPD	:	depth of the most prominent point(g') of the frontal bone surface from fma plane measured in the lateral projection of the radiograph.
X ₈ FBCA-A	:	frontal convex angle after Martin (No. 32-5) ²¹⁾ .
X ₉ FBIA-B	:	frontal bone inclination angle at the nasion whose sides are bregma-nasion and Frankfort Horizontal after Martin (No. 32-1a) ²¹⁾ .
X ₁₀ FBLIA-C	:	inclination of the lower part of the frontal bone surface to the sphenoidale-nasion line. See text.
X ₁₁ FBLIA-D	:	inclination of the lower part of the frontal bone surface to the Frankfort Horizontal.
X ₁₂ FBSNA-E	:	inclination of the sphenoidale-nasion line to the Frankfort Horizontal.
X ₁₃ FBIA-F	:	frontal bone inclination angle at the nasion whose sides are bregma-nasion and sphenoidale-nasion.
X ₁₄ FBNFA	:	angle at the nasion whose two sides reach from this point to the frontomale anterior, left and right, after Howells ¹⁹⁾ .
X ₁₅ CMOD	:	cranial modulus after Martin ²¹⁾ .
X ₁₆ CBW	:	cranial bone weight after Martin (No. 39-a) ²¹⁾ measured by manual methods.
X ₁₇ CSA	:	sagittal section area of the crania, computed from a lateral radiograph tracing enclosed with a calvarial curve and basal lines between the following points: nasion, sphenoidale, basion, opisthion.
X ₁₈ MCL	:	maximum cranial length after Martin (No. 1) ²¹⁾ measured by manual methods.
X ₁₉ MCB	:	maximum cranial breadth after Martin (No. 8) ²¹⁾ measured by manual methods.
X ₂₀ BBH	:	basion-bregma height after Martin (No. 17) ²¹⁾ .
X ₂₁ NBL	:	nasion-basion length after Martin (No. 5) ²¹⁾ .
X ₂₂ PBCH	:	parietal chord after Martin (No. 30) ²¹⁾ .
X ₂₃ PBAC	:	parietal arc after Martin (No. 27) ²¹⁾ .
X ₂₄ OBCH	:	occipital chord after Martin (No. 31) ²¹⁾ .
X ₂₅ OBAC	:	occipital arc after Martin (No. 28) ²¹⁾ .
X ₂₆ PBXT	:	maximum thickness of the parietal bone measured in the lateral X-ray tracing employing a similar method of frontal sinus maximum depth (FSXD).
X ₂₇ OBXT	:	maximum thickness of the occipital bone measured by the same method employed in PBXT measurement.
X ₂₈ SBXT	:	sphenoidal bone thickness defined as the length between sphenoidale and hormion.
X ₂₉ CLBIND	:	cranial length-breadth index after Martin (No. 8/No. 1) ²¹⁾ .
X ₃₀ CLHIND	:	cranial length-height index after Martin (No. 17/No. 1) ²¹⁾ .
X ₃₁ SPBA- α	:	sphenoidal angle at the sphenoidale whose sides are nasion-sphenoidale and basion-sphenoidale after Martin (No. 36) ²¹⁾ .
X ₃₂ BANA- β	:	inclination of the basion-nasion line to the Frankfort Horizontal after Martin (No. 37-2) ²¹⁾ .
X ₃₃ PBCA- γ	:	parietal bone convex angle underlying the curvature of the parietal bone in a lateral radiograph tracing at its maximum height above the parietal chord after Howells ¹⁹⁾ .
X ₃₄ OBCA- δ	:	occipital bone convex angle measured by the same method of PBCA measurement after Howells ¹⁹⁾ .
X ₃₅ MFIA- ϵ	:	inclination angle of the foramen magnum after Martin (No. 34) ²¹⁾ .
X ₃₆ NBLA- ζ	:	angle formed between points nasion-bregma-lambda.
X ₃₇ BLOA- η	:	angle formed between points bregma-lambda-opisthion.
X ₃₈ LOBA- θ	:	angle formed between points lambda-opisthion-basion.

Var. & Abbr.*: variable names and abbreviations.

さ(FBPH)を計測した。側面X線像を用いて前頭部側面陰影の最前方突出点から、fma平面までの深さ(FBPD)を算出した(Table 1, Fig. 8)。

3.3.4 データ解析処理

洞の辺縁輪郭線とモアレ縞そして頭蓋の各標識点は、すべてナジオンを原点とした三次元座標値としてフロッピーディスクに記憶させた。座標系は、Fig. 2に示した。また計測プログラムによって得たデータ(角度、距離、面積、厚さ)は、標本番号、年齢とともに著者が作製した統計解析用データベースに記憶させた。統計解析は、著者がSORD・M200シリーズ・マイクロコンピュータ用に開発した多変量解析システムを用いて行った。この解析システムはデータの各種編集機能と一連の統計解析プログラムより構成され、会話形式で使用できる。この研究で特に用いた手法は、主成分分析法と正準相関分析法である。

3.3.5 モアレ縞と前頭洞X線像との画像合成

モアレ写真とX線写真とを引き伸ばし機を用いて光学的に重ね合わせることは、両者の中心投影による歪みが逆の関係なので不可能である。そこで、マイクロコンピュータを利用して、正投影に補正した前頭洞モアレ縞画像と洞正面X線像とを重ね合せてXYプロットに出力するプログラムを作成した。このプログラムによって合成された画像は、前頭洞外面の三次元形状と、前頭骨の内部に存在する洞形態とを同時に観察するための重要な資料となる。この新しい手法の概要は、すでにFig. 1に示した。Fig. 8に、XYプロットで出力した前頭洞および前頭骨のX線像(a)と合成画像(b)

を用いて、両画像の幾何学的関係を示す。

4 成績

4.1 前頭洞形態計測の基礎統計

4.1.1 計測値の分布についての検討 (Table 2)

前頭洞計測値の標準偏差と変異係数(C. V.)は、すべての項目で大きく、洞形態の個体差が著しいという特徴を示した。また、各計測値の分布についてk-統計量による正規性の検定²⁶⁾を行なった。その結果、多くの項目で正規分布を示した。しかし、眼窩上縁を基準とした高径(FSHo)、正中線を基準とした幅径(FSBm)と面積(FSA, FSAo)、そして洞の深さ(FSXD)は正規分布とはいえない。そこで統計解析には、高径としてFSH、幅径としてFSBそして面積の平方根としてSQR・FSA (SQR・FSAoに比して歪度と尖度が少ない)を用いることとした。ただし、FSXDは尖度では正規分布とはいえない鋭峰分布を示しているが、男女ともに歪みは少なく対称分布であり、他の変数と同じ測定単位なので、変数変換をせずに統計解析に使用した。

4.1.2 左右差の検討 (Table 3)

左右差の検討は、左右の測定値を対標本と考えてt検定(両側)を行なった。その結果、男性、女性、男女混合すべてにおいて左側の高径、幅径、面積が大であり、女性をのぞけば統計学的に有意な差であった。

4.1.3 性差の検討 (Table 4)

男女別平均値を比較すると、FSXDを除くすべての変数で男性の値が大きい。しかし、t検定の結果では、

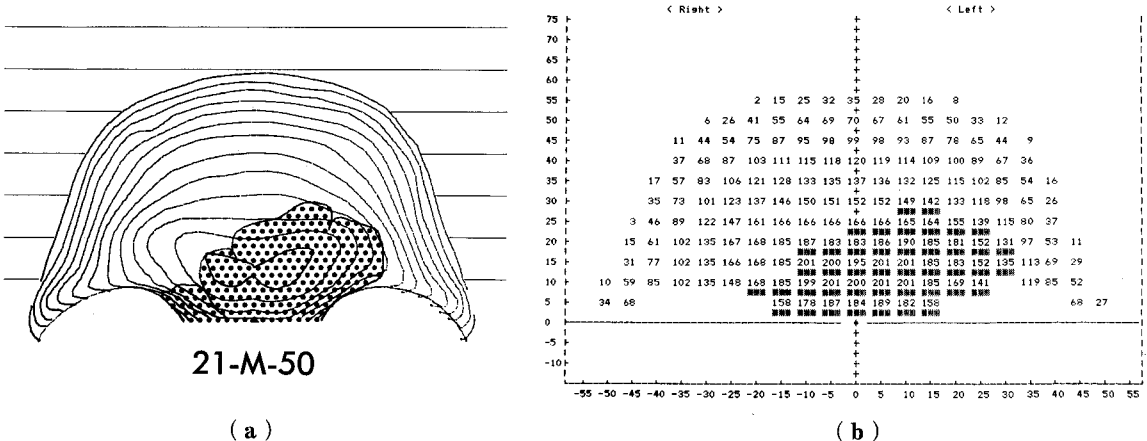


Fig. 7 Comparison of frontal sinus and frontal bone asymmetry. Figures in (b) indicate depth from frontal bone surface to fma-plane.

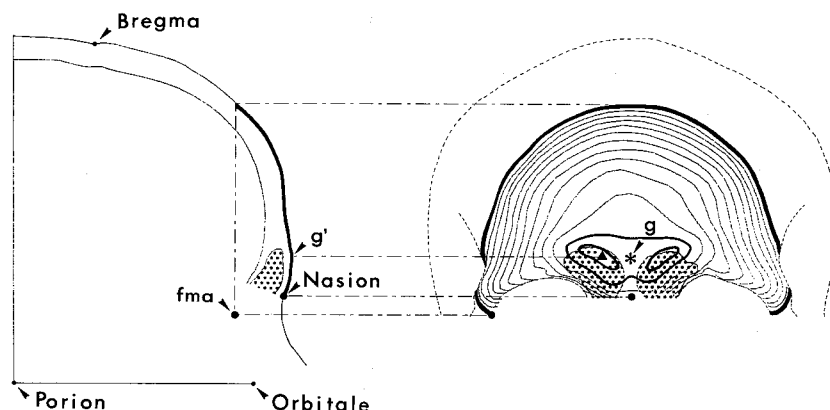


Fig. 8 Geometrical explanation of the superimposed image of a frontal sinus radiograph and a moiré photograph of frontal bone surface. See Table 1.

Table 2 Descriptive statistics for frontal sinus measurements and the skewness and kurtosis of their distributions.

Male (n=55)						Female (n=20)					
		Mean	S. D.	C. V.	k statistics		Mean	S. D.	C. V.	k statistics	
					Skewness	Kurtosis				Skewness	Kurtosis
					(g ₁)	(g ₂)				(g ₁)	(g ₂)
FSHo	r	11.71	8.79	75.06	0.850**	1.432*	7.58	6.95	91.72	0.434	-1.063
	l	14.91	10.54	70.67	0.804*	1.031	9.89	6.63	67.07	0.032	-1.208
	s	26.62	17.97	67.49	0.906**	1.772**	17.48	12.03	68.87	0.129	-1.276
FSH	r	19.01	9.55	50.25	0.367	0.397	15.48	8.30	53.64	0.099	-0.485
	l	22.33	11.08	49.61	0.430	0.731	17.98	7.91	44.01	-0.581	-0.149
	s	41.34	19.37	46.86	0.371	0.916	33.46	14.58	43.58	-0.418	0.057
FSB	r	24.68	11.67	47.28	0.475	0.012	21.12	10.11	47.87	-0.262	-0.339
	l	28.14	12.26	43.57	0.028	0.190	23.10	8.93	38.65	-0.542	1.619
	s	52.82	21.39	40.49	0.060	0.563	44.22	17.06	38.59	-0.545	0.898
FSBm	r	24.89	8.63	34.71	0.163	0.821	21.28	7.90	37.12	-0.461	2.043*
	l	26.02	9.40	36.12	-0.239	1.120	22.43	7.54	33.62	-0.936	2.728**
	s	50.91	17.13	33.65	-0.071	0.822	43.71	14.66	33.53	-0.986	2.715**
FSA	r	374.47	313.03	83.59	1.330***	2.115***	275.10	226.44	82.31	0.773	-0.374
	l	482.98	363.69	75.30	1.293***	2.246***	319.83	186.31	58.25	-0.068	-1.089
	s	857.46	615.71	71.80	1.476***	3.739***	594.94	368.42	61.92	0.386	-0.669
FSAo	r	250.71	269.00	107.29	1.697***	3.891***	154.93	174.55	112.66	1.048*	-0.084
	l	341.24	338.20	99.11	1.651***	3.523***	180.04	147.05	81.67	0.285	-1.511
	s	591.95	556.70	94.04	1.868***	5.646***	334.97	289.22	86.34	0.657	-0.627
SQR. FSA	r	17.50	8.25	47.14	0.174	-0.200	14.77	7.52	50.96	-0.085	-0.741
	l	20.19	8.66	42.90	-0.048	0.302	16.63	6.56	39.43	-0.978	0.614
	s	27.16	10.94	40.28	-0.071	0.686	22.71	8.88	39.11	-0.703	0.685
SQR. FSAo	r	13.06	8.94	68.42	0.238	-0.499	9.42	8.13	86.30	0.211	-1.330
	l	15.82	9.53	60.25	0.171	-0.224	11.55	6.82	59.10	-0.374	-1.129
	s	21.30	11.75	55.15	0.141	0.254	15.87	9.11	57.38	-0.147	-1.015
FSXD		9.66	3.47	35.89	-0.292	1.651**	10.07	4.07	40.41	0.678	4.120***

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

Table 3 Paired *t*-testing of side difference in frontal sinus measurements.

		Mean		t-testing	
		Right	Left	d. f.	t-value
FSH	m	19.01	22.33	54	3.362***
	f	15.48	17.98	19	1.532
	T	18.07	21.17	74	3.692***
FSB	m	24.68	28.14	54	2.363*
	f	21.12	23.10	19	1.015
	T	23.73	26.79	74	2.578*
SQR. FSA	m	17.50	20.19	54	2.904**
	f	14.77	16.63	19	1.330
	T	16.77	19.24	74	3.201***

m : male, f : female, T : m+f

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

有意水準 5% の片側検定を行なっても、すべての変数で統計学的に有意な性差を認めない。

4・1・4 年齢差の検討 (Table 4)

年齢差の検討は、男女共に 17~44 歳 (男 29 例, 女 10 例), 45~83 歳 (男 26 例, 女 10 例) の二群にわけて平均値の差の *t* 検定を行なったが、すべての項目で男女共に統計学的に有意な年齢差を認めない。

4・1・5 前頭縫合の遺残例に対する検討

前頭縫合が外板において完全に遺残するものを前頭縫合遺残例とした。男性 55 例中 8 例 (14.5±9.3%), 女性 20 例中 1 例 (5.0±10.2%) で全体として 12±7.4% の出現率であった。男女による前頭縫合遺残例の出現率には有意差を認めない (Fisher の直接確率計算の結果, $p=0.244$)。

次に男性の前頭縫合遺残例 (8 例) と非遺残例 (47 例) の両者で洞の大きさに差が見られるかについて, *t* 検定を行なった (Table 5)。その結果すべての計測項目で、前頭縫合遺残例は非遺残例よりも小さな平均値を示し、統計学的に有意差を認めた。

前頭縫合の遺残は、Metopism と称され、人類学では normal variation と考えられており、臨床医学的にも他に異常を伴わないことが知られている。その意味では Metopism の個体を、前頭洞計測値の統計分析の対象に含めても良いと考える。一方 Metopism 例では、確かに前頭洞の大きさの平均値は有意に小さいといえるが、あくまでも平均値の比較であり、Metopism の個体が、前頭洞形態の異常な集団に属するとはいえない。そこで、Metopism 例の洞計測値が異常値か否かという問

Table 4 *t*-testing of sex and age difference.

		Sex diff.		Age diff.	
				Male	Female
				d. f.=73	d. f.=53
				d. f.=18	
FSH	r	1.444	0.126	1.103	
	l	1.591	0.507	0.371	
	s	1.634	0.352	0.409	
FSB	r	1.193	0.124	0.873	
	l	1.658	0.883	0.626	
	s	1.597	0.572	0.182	
SQR. FSA	r	1.278	0.028	1.121	
	l	1.648	0.745	0.644	
	s	1.611	0.473	0.255	
FSXD		0.416	0.536	1.285	

None of these *t*-values reached a statistically significant level at either 0.05 or 0.10 with both side testing.

Table 5 *t*-testing of difference between metopism ($n=8$) and non-metopism ($n=47$) in frontal sinus measurements in male ($n=55$).

		Metopism		Non-metopism		t-value
		Mean	S. D.	Mean	S. D.	
FSH	r	11.03	7.173	20.37	9.401	2.260**
	l	12.32	7.287	24.03	10.877	2.923**
	s	23.36	12.659	44.40	18.941	3.017**
FSB	r	15.67	8.007	26.21	11.688	2.187*
	l	19.58	10.738	29.59	12.139	2.187*
	s	35.26	17.297	55.81	20.949	2.620*
SQR. FSA	r	11.16	6.417	18.58	8.184	2.433*
	l	12.38	6.736	21.52	8.394	2.914*
	s	17.07	8.444	28.88	10.565	2.994**
FSXD		7.22	3.546	10.08	3.357	2.210*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

題を検討した。前頭洞の生物学的存在意識がまだ不明なのであるから、意味のある異常値の定義を行なうことはできない。そこで測定値の分布が正規分布であるという仮定のもとに、統計学的な立場から異常値の判定を行なうしかない。ただし正規分布にも、一変量正規分布の立場と多変量正規分布としてあつかう場合が存在する。一変量分布のみを考慮して、異常値の検出

を行なう方法として、生データに対して基準値化を行ない、この値が正規分布の両側5%の値(1.96)を越える値を異常例とする方法と、増山のt検定による方法を用いた²⁶⁾。多変量分布としての異常データの検出は、主成分分析を用いる方法を採用した²⁷⁾。

主成分分析の結果の詳細は後述するが、異常値の判定は第三主成分得点までを用いて行なった。例として、第一と第二主成分得点による散布図 (Fig. 10) を見ると、図中の X 軸と Y 軸上で、 ± 1.96 の範囲を正常値と判定できる。つまり、Metopism (○△) 9 例中 2 例、非 Metopism (●▲) 66 例中 6 例が異常と判定される。なお第三主成分得点 (3rd P. C. S.) 上で異常値と判定した 3 例の中には Metopism の例を認めなかった。

結局、三つの方法によって、どの一つの方法でも異常と判定した例は、75 例中 13 例であり、そのうち 2 例が Metopism であった。そこで Metopism の有無と異常値判定の有無との両者について、Fisher の直接確率計算で無相関検定を行なったところ有意な相関は認めなかった ($p=0.482$)。

従って、Metopism 群で洞計測値の平均値は有意に小さな平均値を示すが、統計学的に異常に小さな洞形態を示す頻度の高い集団とは判定し得ない。なお、異常値と判定された 13 例の頭蓋について、全身的にも局所的にも骨疾患を思わせる所見は認めなかった。

4・2 前頭洞計測値に対する主成分分析

前頭洞形態の各計測項目間の相関行列 (Table 6) に対して、主成分分析を適用して、洞形態の特徴を抽出し、各項目間の関係を要約する。分析の対象は男性 (55 例)、女性 (20 例)、男女混合 (75 例) の 3 群である。洞形態の計測は 10 項目で、すべての組合せで互いに有意な単相関係数を示し、これは 3 群とも同様であった。また主成分分析の結果、第三主成分まで各群に共通して意味のある解釈が得られ、各群ともほぼ 97% の累積寄与率を示したので、男女混合群の相関行列 (Table 6 の上半部) に対する主成分分析の結果を以下に述べる。

第一主成分に対する因子負荷量はすべて正の符号で、どの変数に対してもほぼ均等に大きな値を示す (Table 7)。すなわち主成分分析の用語でいう “size factor” であり、第一主成分は前頭洞の大きさを意味する。第二主成分は、正負の符号が混在する両極性の因子で、いわゆる “shape factor” である。その因子負荷量を吟味すると左側洞の測定項目で負、右側の測定項目で正の符号をとる。また左右合計の測定項目と FSXD では絶対値が小さい。つまり第二主成分は、左右差を意味する因子と解釈できる。第三主成分に対する因子負荷量は FSXD だけが正符号で大きな絶対値を示し、他の項目はすべてほぼ零に近い。すなわち、洞の深さを意味する因子である。

Table 6 Correlation coefficients between frontal sinus measurements.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
(1) FSH (r)		.741	.876	.658	.968	.715	.925	.854	.905	.546
(2) FSH (l)	.762 (.617)		.621	.920	.693	.974	.941	.861	.922	.654
(3) FSB (r)	.868 (.895)	.630 (.540)		.607	.954	.611	.794	.894	.838	.513
(4) FSB (l)	.647 (.656)	.922 (.890)	.597 (.606)		.640	.966	.853	.899	.890	.593
(5) SQR. FSA (r)	.965 (.974)	.713 (.586)	.952 (.958)	.633 (.628)		.675	.881	.886	.898	.561
(6) SQR. FSA (l)	.718 (.663)	.974 (.968)	.608 (.574)	.970 (.939)	.677 (.634)		.913	.882	.929	.658
(7) FSH (s)	.929 (.904)	.948 (.894)	.788 (.803)	.846 (.856)	.883 (.873)	.911 (.903)		.919	.979	.646
(8) FSB (s)	.845 (.873)	.872 (.785)	.888 (.909)	.899 (.882)	.882 (.896)	.888 (.831)	.915 (.924)		.964	.618
(9) SQR. FSA (s)	.903 (.898)	.932 (.863)	.833 (.844)	.891 (.867)	.896 (.898)	.931 (.905)	.978 (.980)	.965 (.953)		.678
(10) FSXD	.609 (.456)	.648 (.713)	.548 (.482)	.631 (.616)	.619 (.475)	.688 (.708)	.691 (.647)	.661 (.608)	.721 (.673)	

Note ; Upper half : male & female (n=75), Lower half : male (n=55),

In parentheses : female (n=20)

All of these values reach a statistical significance level at 0.05.

Table 7 Eigenvalues, cumulated proportions (Cum. %) of total variance and factor loadings of the first 4 principal components. $N=75$.

		1st P.C.	2nd P.C.	3rd P.C.	4th P.C.
Eigenvalue		8.243	0.935	0.519	0.217
Cum. %		82.4	91.8	97.0	99.2
FSH	r	0.906	0.342	-0.011	0.218
FSH	l	0.922	-0.323	-0.097	0.129
FSB	r	0.852	0.466	0.023	-0.216
FSB	l	0.889	-0.367	-0.176	-0.167
SQR.FSA	r	0.902	0.421	0.038	0.040
SQR.FSA	l	0.922	-0.361	-0.105	0.010
FSH	s	0.980	-0.012	-0.057	0.178
FSB	s	0.972	0.049	-0.090	-0.211
SQR.FSA	s	0.997	-0.007	-0.032	0.020
FSXD		0.703	-0.228	0.674	-0.027

Bartlett の球状検定²⁸⁾の結果では第五主成分までが有意だが、第四主成分以降はその寄与率もきわめて小さく、因子負荷量も各群でまちまちの結果を示すので、主成分の解釈は第三主成分までとした。

以上の様に、10 項目の測定によって 10 次元空間に存在する前頭洞形態の情報のうち 97% の部分は、三つの主成分軸で構成される 3 次元部分空間で要約出来た。また第一主成分と第二主成分による 2 次元平面だけでも、91.8% の情報を要約できる。そこで第一主成分に対する因子負荷量を縦軸に、第二主成分に対する因子負荷量を横軸として、各測定項目がどのような関係にあるかを図示した (Fig. 9)。図のごとく、FSXD 以外の項目は、すべて半径 1 (因子負荷量の自乗和) の円周に近く存在し、第一と第二主成分だけでかなりの情報

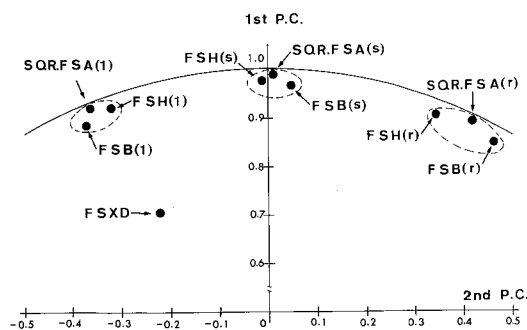


Fig. 9 Plotting of factor loading with the use of 1st principal component (1st p.c.) and 2nd principal component (2nd p.c.). The dotted boundaries surrounding three groups indicate their closely correlation each other.

が説明される変数ということになる。しかし、FSXD は円周から離れて存在し、第三主成分以降に情報が残されていることを示す。つまり前頭洞の深さは、正面 X 線像による高径、幅径、面積という平面的な測定とは異なった次元の特徴をもつ測度といえる。またこの図は、右側、左側、左右合計の各々の測定項目が、三つのグループを形成していることを示す。つまり、同じ測定項目での左右の関連よりも、測定方法が異なっても同一側の測定項目間同志が強く関連しているといえる。

次に、前述した三つの主成分を用いて、個体ごとに主成分得点を算出し、男女差、前頭縫合遺残さらに年齢差による分布の違いについて検討した。第一主成分得点を縦軸、第二主成分得点を横軸とした二次元平面上で、男女合計 75 例の散布状態を図示した (Fig. 10)。同図を見ると女性 (●○) の第一主成分得点は、男性 (▲△) より小さい値を示す例が多い。しかし、全体の分布から見て女性といえども男性の分布範囲内であることが良くわかる。また前頭縫合遺残例 (△○) の 9 例のすべてが、第一主成分軸上で負の値をとり、前頭洞が小さいことを示している。しかし、全体の分布から見て決して単独のグループを形成していないことがわ

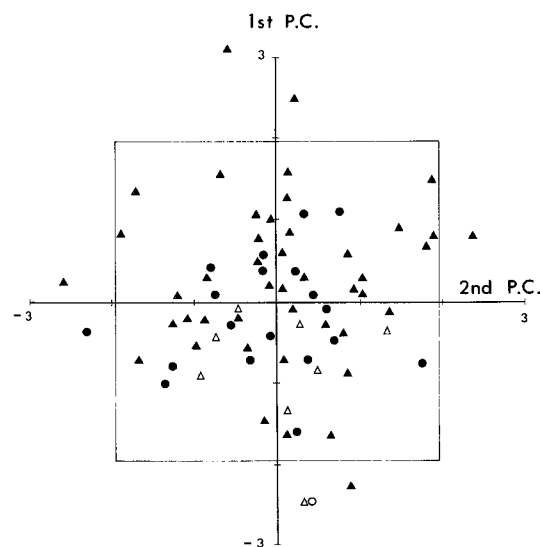


Fig. 10 Plotting of factor score employing the 1st and 2nd principal components.

●...female (n=19)
○...female with metopism (n=1)
▲...male (n=47)
△...male with metopism (n=8)

かる。年齢による分布も、この散布図を用いて検討した。繁雑となるので図示はしないが、年齢差によるグループの形成は認めなかった。また第三主成分得点を用いて同様の検討を行なったが、特異なグループの形成を認めなかった。

4.3 前頭洞と前頭骨の計測値に対する相関分析

4.3.1 単相関係数の検討

前頭洞計測項目は、全体的な大きさを表現するものとして高径、幅径、面積の各々の左右合計値、そして最大の深さ(FSXD)を用いた。前頭骨計測項目としては、正中矢状弦長や最大骨厚など、Table 1で定義した14項目($x_1 \sim x_{14}$)を使用した。Table 8のごとく、前頭骨計測値の中で大きさを表現する計測値($x_1 \sim x_8$)の中で、 x_5 (FBXT)だけは男女共通して有意な相関係数を示したが、他は有意な相関を認めない。これに対して、前頭骨の形を表現する角度計測項目のほとんどが、洞の大きさと有意な相関を示した。また標本相関係数を z 変換して、男女間の正規偏差(u_0)を算出(Table 8 欄外の式)して母集団での相関係数の性差を検定した。その結果、前頭洞と前頭骨の計測値の相関係数は、 x_9 (FBIA-B)、 x_{11} (FBLIA-D)を除けば性差が少ないといえる。

4.3.2 正準相関分析法による検討

正準相関分析法は、最初 Hotelling (1935) によって開発された²⁸⁾。しかし奥野らも述べている様に、その概念は大変理解しにくい²⁹⁾。そこで実際の分析にうつる前にその概略を述べる。

4.3.2.1 正準相関分析概説

p 個の変数からなる X グループと、 q 個の変数からなる Y グループとの相関を論ずる場合、2 変数相関関係をすべて用いたならば、 $p \times q$ 通りの相関を論ずることになる。さらに X , Y の各変数間の内部相関をも考慮して、グループ間の相関を論じようとするのはなおさら煩雑となる。そこで、 X グループ、 Y グループの各々の変数を適宜合成して、2 つの合成変数にまとめた上で、合成変数 X と Y との関係を論じようというのが正準相関分析の目的である。各々のグループを新たな合成変数にまとめるためには、各変数に対する「重みづけ」が必要となるが、重要度の基準は一般には存在しない。そこで、正準相関分析では以下に述べる方法を用いて「重み」を決定する。

X グループの変数群を $x_i (i=1, 2, \dots, p)$, Y グループの変数群を $y_j (j=1, 2, \dots, q)$, x_i に対する重みの係数を α_i , y_j に対して β_j とする(ただし $q \leq p$)。

Table 8 Correlation coefficients between frontal bone measurements.

Male (n=55), Female (n=20).

	Frontal sinus measurements											
	Height (FSH (s))			Breadth (FSB (s))			Area (SQR. FSA (s))			Depth (FSXD)		
	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0
FBCH	.208	.113	.349	.204	.330	.486	.225	.208	.063	.322*	.437	.481
FBAC	.013	.109	.345	.062	.317	.952	.056	.204	.539	.228	.401	.689
FBXB	-.075	.074	.534	-.023	.209	.841	-.043	.115	.567	-.060	.094	.552
FBMB	-.155	-.144	.040	-.044	-.007	.132	-.076	-.125	.177	.095	-.203	1.077
FBXT	.590***	.527*	.328	.572***	.531*	.211	.591***	.508*	.426	.643***	.165	2.135*
FBPH	-.220	.194	1.503	-.101	.162	.947	-.185	.176	1.306	-.307*	.132	1.610
FBPD	-.223	.245	1.706*	-.184	.181	1.321	-.175	.235	1.490	.027	.303	1.023
FBCA-A	.418**	-.005	1.611	.307*	-.109	1.527	.363**	-.053	1.551	.165	-.034	.717
FBIA-B	-.408**	.235	2.450**	-.335*	.122	1.686*	-.368**	.187	2.059*	-.219	.439	2.482**
FBLIA-C	-.525***	-.351	.775	-.459***	-.338	.516	-.493***	-.363	.571	-.387**	-.416	.123
FBLIA-D	-.454***	.217	2.544**	-.376**	.191	2.107*	-.409***	.199	2.276*	-.213	.309	1.917*
FBSNA-E	-.287*	-.568**	1.250	-.285*	-.529*	1.058	-.297*	-.562**	1.179	-.401**	-.728**	1.788*
FBIA-F	-.544***	-.567**	.119	-.484***	-.616**	.681	-.519***	-.604**	.445	-.481***	-.604**	.626
FBNFA	-.095	.347	1.636	-.023	.319	1.516	-.078	.321	1.470	-.078	.426	1.908*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.001$

d. f. of male=53, d. f. of female=18

Note: z -transformation

$$z_1 = 1/2 \cdot \log_e \{ (1+r_1) \}, \quad z_2 = 1/2 \cdot \log_e \{ (1+r_2)/(1-r_2) \},$$

$$u_0 = (z_1 - z_2) / \{ 1/(n_1 - 3) + 1/(n_2 - 3) \}^{1/2}$$

そして

$$X = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_p x_p$$

$$Y = \beta_1 y_1 + \beta_2 y_2 + \cdots + \beta_q y_q$$

という線形結合を考え、YとXとの相関係数を最大とする条件を与えて、重みベクトル(weight vector) α , β を決定するのである。

最大にされた相関係数を正準相関係数(Canonical correlation coefficient)といい、 ρ で表わすと、

$$\rho = \text{cov}(X, Y) / \{\text{var}(X)\text{var}(Y)\}^{1/2}$$

となる。

X, Y を正準変数といい、 $q \leq p$ ならば理論的には q 組の正準結合が存在し、その中で最大の正準相関係数を第一正準相関係数(1st canonical correlation coefficient)という。次に第一正準結合とは互いに無相関となるように、第二以降の正準結合を求めるのである。新たな合成変数 X, Y が決れば、もとの変数 x_i , y_i との相関係数を求めることができる。これを構造ベクトル(structure vector)という。構造ベクトルを検討することで、正準変数 X, Y のもつ意味が解釈できる。

また、仮りに Y を基準変数、X を予測変数とすると、もとの x_i , y_j を基準値化しておけば、 $Y = \rho X$ という単純な関数関係に要約できる。

さらに、正準変数 Y によって Y グループから抽出さ

れた分散の割合は、Y にたいする構造ベクトル Sy を用いて $(Sy'Sy)/q$ であり、そのうち ρ^2 の部分が正準変数 X との最大の相関を示すことになる。

Cooly and Lohnes は、Stewart and Love が“Redundancy”(冗長性)の測度として定義した

$Rdy = \rho^2 \cdot (Sy'Sy)/q$, $Rdx = \rho^2 \cdot (Sx'Sx)/p$ に注目した。“Redundancy”は、Y グループと X グループで形成される情報空間において最大の相関を示す情報の実際の重複量を示しており、重要な解析手段となる。なお詳細な説明およびコンピュータアルゴリズムについては文献²⁸⁻³⁰⁾にゆずる。

4.3.2.2 分析結果

前頭洞計測項目グループ(以下、Y 群)を基準変数、前頭骨計測項目グループ(以下、X 群)を予測変数として、正準相関分析によってグループ間の相関を分析した。分析は Table 8 に示した 4 項目の X 群と、14 項目の Y 群を用いた。対象集団としては男性、女性そして男女混合の 3 群を用いた。分析結果はどの群でも同様(ただし女性群の正準相関係数は 0.983 と高いが、有意ではなかった)であったので、男女混合群 75 例の相関行列 (Table 9) に対する分析結果を述べる。

理論的には四つの正準相関係数を得るが、Bartlett の検定²⁸⁾によると、第二正準相関係数までが 5% 水準で有意となったので、この最初の 2 組の正準結合に関する

Table 9 Original matrix of correlation coefficients between frontal bone measurements (X-group) and frontal sinus measurements (Y-group). N=75

	X-group														Y-group			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
X ₁	1.000																	
X ₂	.922	1.000																
X ₃	.256	.385	1.000															
X ₄	.238	.369	.675	1.000														
X ₅	.228	.095	.055	.119	1.000													
X ₆	-.227	.047	.077	.051	-.296	1.000												
X ₇	.252	.443	.327	.309	.038	.352	1.000											
X ₈	.099	-.273	-.379	-.360	.350	-.620	-.326	1.000										
X ₉	-.051	.024	.281	.106	-.116	.285	.490	-.167	1.000									
X ₁₀	-.365	-.085	.282	.282	-.432	.511	-.314	-.711	.359	1.000								
X ₁₁	-.128	.149	.379	.263	-.297	.610	.520	-.718	.713	.767	1.000							
X ₁₂	-.402	-.326	-.051	.097	-.285	.005	-.188	-.172	-.365	.557	-.106	1.000						
X ₁₃	-.421	-.288	.182	.179	-.365	.241	.227	-.302	.478	.822	.488	.643	1.000					
X ₁₄	-.086	-.023	-.063	-.109	.070	.163	.354	-.044	.181	.053	.167	-.136	.019	1.000				
Y ₁	.247	.115	.019	-.083	.591	-.129	-.021	.354	-.236	-.511	-.321	-.376	-.547	-.027	1.000			
Y ₂	.289	.194	.082	.024	.578	-.055	-.004	.245	-.199	-.455	-.261	-.368	-.510	-.026	.919	1.000		
Y ₃	.277	.165	.051	-.023	.588	-.105	.014	.298	-.208	-.486	-.283	-.387	-.536	-.013	.979	.964	1.000	
Y ₄	.293	.241	-.035	-.006	.479	-.124	.071	.097	-.037	-.374	-.060	-.505	-.505	-.050	.646	.618	.678	1.000

分析結果を Table 10 に示す。

まず Y 群から抽出された第一正準変数 (Y_1) と, $y_1 \sim y_4$ との構造ベクトルを見ると, y_4 は 0.654 とやや低い値ではあるが, すべて高い正の相関を示す。従って, Y_1 は前頭洞の全体の大きさを意味する合成変数と解釈できる。次に X 群から抽出された第一正準変数 (X_1) と, $x_1 \sim x_{14}$ との構造ベクトルを見ると, 正符合で最も大きな値をとる変数は x_5 で, 負の符合では x_{13} であり, この合成変数は両極の因子である。また前頭骨の大きさの計測項目 ($x_1 \sim x_7$) の値は x_5 を除けばきわめて小さく, これに対して前頭骨の角度計測項目 ($x_8 \sim x_{13}$)

Table 10 Canonical correlation analysis between frontal sinus measurements ($Y_1 \sim Y_4$) and frontal bone measurements ($X_1 \sim X_{14}$). N=75.

		1st canonical variable		2nd. canonical variable	
		W-vect.	S-vect.	W-vect.	S-vect.
Y ₁	FSH (s)	2.250	0.970	- 1.712	-0.007
Y ₂	FSB (s)	0.693	0.870	0.842	0.163
Y ₃	SQR. FSA (s)	- 2.076	0.917	0.175	0.107
Y ₄	FSXD	0.179	0.654	1.175	0.708
X ₁	FBCH	1.532	0.295	- 0.553	0.342
X ₂	FBAC	- 1.700	0.118	0.811	0.447
X ₃	FBXB	0.412	-0.118	- 0.660	0.007
X ₄	FBMB	- 0.299	-0.156	0.380	0.243
X ₅	FBXT	0.539	0.752	0.318	0.226
X ₆	FBPH	0.355	-0.168	- 0.417	0.018
X ₇	FBPD	0.290	-0.083	- 0.370	0.189
X ₈	FBCA-A	0.051	0.460	- 0.742	-0.374
X ₉	FBIA-B	-11.720	-0.305	2.841	0.250
X ₁₀	FBLIA-C	- 1.446	-0.660	30.725	-0.055
X ₁₁	FBLIA-D	1.530	-0.412	-25.712	-0.337
X ₁₂	FBSNA-E	-12.018	-0.489	-17.560	-0.527
X ₁₃	FBIA-F	11.263	-0.710	- 2.939	-0.289
X ₁₄	FBNFA	- 0.112	-0.055	- 2.933	0.129
Canonical correl. coefficients		0.792		0.642	
Chi-square value		119.600		55.880	
N. d. f.		56		39	
Probability		<0.001		<0.05	
Redundancy for Y, given X		46.6%		5.2%	
		Total* 53.5%			
Redundancy for X, given Y		10.7%		3.2%	
		Total* 15.4%			

W-vect. : weight vector for original variables.

S-vect. : structure vector for original variables

Total* : total "Redundancy" of 1st to 4th canonical correlation.

の値が前者に比して大きい値を示すことが特徴的である。つまり x_1 は前頭骨の形を意味する合成変数と解釈できる。そして Y_1 と X_1 との正準相関係数は 0.792 と有意に高く, 前頭洞の大きさは, 前頭骨の形と有意な相関を示すと言える。洞の大きさは, 前頭骨の厚さ (x_5) や前頭骨の矢状方向湾曲角 (x_8) と特に大きな正の相関を示し, 前頭骨の傾斜角 ($x_9 \sim x_{11}$, x_{13}), 前頭蓋底の耳眼平面に対する傾斜角 (x_{12}) とは負の相関を示す。そして x_{14} すなわち前頭骨下部の水平方向の湾曲角 (顔面の平坦度としても使う) とは相関が低い。さらに重要な解析である "Redundancy" について検討すると, X 群のデータが与えられるならば, Y 群の情報の 46.6% の部分を説明できることがわかる。逆に Y 群のデータを与えても, X 群の情報空間のたった 10.7% しか説明できない。つまり, 前頭骨の形の情報が与えられるなら, 第一正準結合だけを用いても, $Y_1 = 0.792 X_1$ という単純な関数関係によって, 前頭洞の大きさの情報を充分に説明できることを意味する (Fig. 11)。

次に Y 群から抽出された第二正準変数 (Y_2) の意味

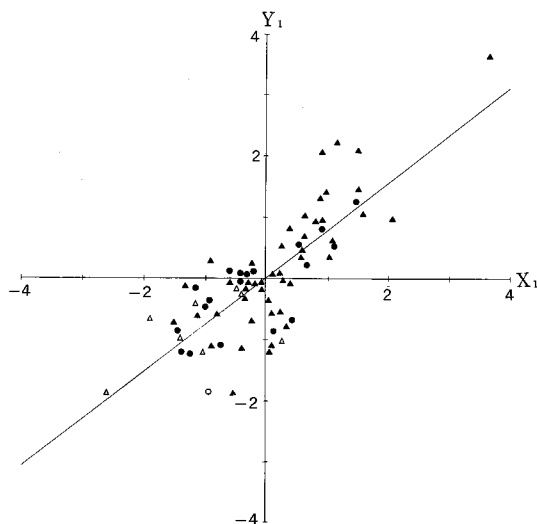


Fig. 11 Canonical correlation diagram between frontal sinus measurements and frontal bone measurements employing the 1st canonical scores.

● & ○...female

▲ & △...male, see Fig. 10.

Y-axis : 1st canonical variable computed from frontal sinus measurements (Y_1)

X-axis : 1st canonical variable computed from frontal bone measurements (X_1).

$$Y_1 = 2.250 y_1 + 0.693 y_2 - 2.076 y_3 + 0.179 y_4$$

$$X_1 = 1.532 x_1 - 1.700 x_2 + \dots - 0.112 x_{14}$$

See Table 10.

Table 11 Correlation coefficients between frontal sinus and cerebro-cranial measurements.

	Frontal sinus measurements											
	Height (FSH (s))			Breadth (FSB (s))			Area (SQR. FSA (s))			Depth (FSXD)		
	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0	Male	Female	u_0
X ₁₅ CMOD	.060	-.007	.240	.097	.228	.482	.117	.072	.163	.149	.203	.200
X ₁₆ CBW	.004	-.122	.453	-.018	-.170	.550	.007	-.159	.599	.156	-.207	1.315
X ₁₇ CSA	-.174	.003	.640	-.071	.215	1.036	-.095	.081	.632	-.008	.203	.765
X ₁₈ MCL	.191	.054	.499	.251	.202	.185	.254	.089	.610	.275*	.221	.206
X ₁₉ MCB	.086	.154	.247	.049	.356	1.157	.086	.256	.629	.069	.233	.602
X ₂₀ NBH	-.273	-.111	.604	-.207	.064	.981	-.221	-.059	.593	-.150	.010	.577
X ₂₁ NBL	.066	-.265	1.208	.063	-.085	.531	.069	-.201	.977	.001	-.288	1.064
X ₂₂ PBCH	-.305*	-.133	.649	-.220	-.019	.733	-.243	-.094	.550	-.136	.027	.586
X ₂₃ PBAC	-.280*	-.133	.551	-.206	-.001	.744	-.226	-.078	.543	-.134	.048	.654
X ₂₄ OBCH	.043	.127	.303	.067	.167	.363	.060	.114	.195	-.181	.152	1.203
X ₂₅ OBAC	.116	.223	.395	.115	.194	.290	.126	.175	.179	-.020	.202	.805
X ₂₆ PBXT	.267*	.095	.638	.209	.232	.087	.263*	.112	.561	.218	.011	.754
X ₂₇ OBXT	-.127	.181	1.112	-.120	.128	.892	-.110	.190	1.084	.041	-.070	.398
X ₂₈ SBXT	.348**	.359	.045	.301	.413	.460	.339*	.392	.219	.463***	.275	.783
X ₂₉ CLBIND	-.044	.114	.567	-.108	.188	1.069	-.081	.180	.942	-.107	.060	.599
X ₃₀ CLHIND	-.347**	-.270	.305	-.355**	-.227	.502	-.358**	-.249	.430	-.325*	-.232	.361
X ₃₁ SPBA- α	-.280*	-.528*	1.073	-.271*	-.481*	.882	-.291*	-.499*	.889	-.284*	-.512*	.979
X ₃₂ BANA- β	-.081	-.344	.993	-.080	-.350	1.021	-.077	-.368	1.106	-.212	-.745***	2.671**
X ₃₃ PBCA- γ	.075	.105	.108	.057	-.061	.423	.066	-.006	.258	.058	-.116	.625
X ₃₄ OBCA- δ	-.280*	-.109	.638	-.207	.026	.845	-.264*	-.032	.853	-.307*	-.155	.576
X ₃₅ MFIA- ϵ	-.179	-.131	.176	-.115	-.098	.062	-.145	-.138	.026	-.122	-.274	.568
X ₃₆ NBLA- ζ	.299*	-.096	1.449	.241	-.107	1.264	.266*	-.136	1.465	.007	-.165	.621
X ₃₇ BLOA- η	-.071	.051	.437	-.096	-.041	.492	-.089	-.083	.617	.057	.010	.168
X ₃₈ LOBA- θ	-.090	-.209	.436	-.031	-.127	.346	-.051	-.197	.532	-.027	-.299	1.007

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

d. f. of male=53, d. f. of female=18

 u_0 , see Table 8.

を、構造ベクトルによって解釈すると $y_1 \sim y_3$ の値はきわめて小さく、 y_4 のみ 0.708 と大きな正の相関を示すことから、 Y_2 は前頭洞の深さを意味する正準変数と解釈できる。 X_2 の構造ベクトルを検討すると、特に x_2 と x_{12} で大きな値を示し、 X_1 とは質を異にするがやはり前頭骨の形を意味する正準変数と解釈できる。

さらに、四つの正準結合すべての全冗長性測度 (Table 10 の Total*) を計算すると、前頭骨計測値によって実際に説明できる前頭洞計測値の情報は 53.5% に達することがわかる。逆に、前頭洞計測値によって説明できる前頭骨計測値の情報は 15.4% である。

次に、Fig. 11 を用いて性別、年齢別、前頭縫合の有無による散布状態の観察から、これらの要因が前頭洞と前頭骨との形態上の相関に与える影響を検討した。その結果、 $Y_1 = 0.792 X_1$ の直線との関係において、特異

な散布状態を呈する要因を認めなかった。

4.4 脳頭蓋と前頭洞の計測値に対する相関分析

4.4.1 単相関係数の検討

前頭骨計測項目を除いた脳頭蓋計測 24 項目と、前頭洞計測 4 項目との単相関係数と、その有意性検定の結果を Table 11 に示す。脳頭蓋計測項目は、大きさの測度として 14 項目 ($x_{15} \sim x_{28}$)、形の測度として 10 項目 ($x_{29} \sim x_{38}$) を用いた。

脳頭蓋の大きさと前頭洞の大きさとの相関係数は、女性ではすべての項目で有意性を認めず、男性でも有意な相関を示した項目は少ない。男性では、 x_{22} と x_{23} で負、 x_{18} 、 x_{26} 、 x_{28} で正の有意な相関を認めたが、その寄与率は低い。

脳頭蓋の形と前頭洞の大きさとの相関では、男女共通して有意な相関係数を認めた項目は、 x_{31} (蝶形骨角)

であり、臨床 X 線診断学用語でいう Welcker 法による頭底角 (basal angle) に相当する。男性で有意性を認めた項目としては、 x_{30} (頭長高指数)、 x_{34} (後頭骨湾曲角) が負の相関を示し、 x_{36} (UBLA) が正の相関を示す。女性の x_{32} (頭骨底角) は y_4 (FSXD) に対して男性より有意に高い負の相関を示すが、全体としては相関係数の性差は少ないと考える。

4.4.2 正準相関分析法による検討

前頭骨を除いた脳頭蓋計測項目群として、Table 11 の中で、有意な単相関係数を示した 10 項目 (x_{18} , x_{22} , x_{23} , x_{26} , x_{28} , x_{30} , x_{31} , x_{32} , x_{34} , x_{36}) を用いて、前頭洞計測群 (前述の Y 群) との正準相関分析を行なった。その結果、男性、女性、男女混合のすべてにおいて有意な正準相関を認めた。

男女混合群について報告すると、第一正準相関係数は 0.719 であり、Bartlett の検定で 0.1% 以下の危険率で有意であった ($\chi^2=73.130$, d. f.=40)。第二正準結合以降で抽出される情報は少なく、正準相関係数も有意ではなかった。

第一正準結合での “Redundancy” を検討すると、脳頭蓋計測値群によって説明できる前頭洞計測値群の情報の割合は 37.1% であった。また、前頭洞計測値群の第一正準変数の構造ベクトルは、すべて同符合 (負) でほぼ均等な大きさであったが、特に y_4 (FSXD) が第一正準変数と高い相関係数 (0.959) を示した。そして、脳頭蓋計測値群の第一正準変数と負の相関を示す項目は、頭頂骨と蝶形骨の厚さ (x_{26} , x_{28}) であり、正の相関を示すのは、頭長高指数と蝶形骨角 (x_{30} , x_{31}) であった。

4.5 合成画像の観察所見

以上、形態計測値の予備的解析を統計学的手法で行なったが、その結果を実際の標本の観察によって確認することが重要である。また、複雑な三次元形状を呈する前頭洞や頭蓋の形態情報が、単純な二次元的計測値だけで十分に表現されているとは限らない。殊に、眉間や眉弓の形態を客観的に表現することは容易ではない。

そこで、前頭洞正面 X 線像と前頭鱗外面のモアレ縞写真との合成画像および前頭洞と頭蓋の側面 X 線像を用いて、個々の標本の詳細な観察を行なった。

Fig. 12~15 に、コンピュータによって出力された 75 例の合成画像を男女別に、年齢順に示す。側面画像は、前頭洞発育の良好例、不良例を男女各 2 例ずつ対比して、Fig. 16 に示す。

Fig. 12~15 を見ると、前頭洞の大きさは著しい個体

差を示し、左右差も著明であることが充分に確認できる。さらに、年齢別、男女別の形態の差異は一定の傾向を示さないこともわかる。

まず前頭洞形態と頭蓋形態との相互関係を検討するためには、出力画像を前頭洞の大小順に並べかえて観察する必要がある。しかし三次元的に複雑な発育形態を示す前頭洞の大きさを、的確に表現しえる基準は一般に存在しない。そこで主成分分析の結果にもとづき、第一主成分得点 (1st P. C. S. として Fig. 12~15 に示す) の順に合成画像を並べ替えてみれば、第一主成分得点の前頭洞の三次元的な大きさをよく表現していることがわかる。ただし、Fig. 12~15 は前頭洞の正面観のみで、深さの情報は見えないので、大小関係が多少矛盾して見える例もある。第一主成分得点は、左右の前頭洞の幅径、高径、面積および、正中矢状面近傍での最大の深さの合成得点であり、主成分分析の結果が実際に有用で意味のあることを確認できる。同様に、第二主成分得点 (2nd P. C. S.) を検討すると、負の得点が左側優位、正の得点が右側優位の前頭洞形態を示す様子がよくわかる。なお Fig. 12~15 には、前頭洞の奥行の情報として第三主成分得点 (3rd P. C. S.) を表示した。

まず第一主成分得点の順にモアレ縞画像を検討すると、前頭洞発育の良好な例では前頭鱗が急激に後方へ傾斜しており、発育の悪い例では逆に後方への傾斜は緩やかである。この傾向は、前頭洞計測グループと前頭骨計測グループにたいする正準相関分析の結果とよく一致する。またモアレ縞画像は眉間部の状態や眉弓の発達程度を容易に観察でき、Fig. 12~15 によって前頭洞の発育程度との関係を対比してみたが、ほとんど一定の関係は存在しないことがわかる。これは Table 8 の x_6 と x_7 すなわち眉間や眉弓の形態計測値が、前頭洞の大きさと有意な相関係数を示さなかったことに一致する。

次に、前頭洞の左右差を意味する第二主成分得点と前頭鱗外面の三次元的歪みの関係を、合成画像によって検討した。合成画像の視覚的な検討では、前頭洞の左右差に対応し得る程の前頭鱗外面の歪みは認めない。

また Fig. 7 で示したように、コンピュータによって、モアレ縞画像データをもとに垂直方向、水平方向のすべての断面で、左右の起伏、傾斜角度の差を統計学的に検討したが、前頭洞が示す様な著明な左右差は検出できなかった。

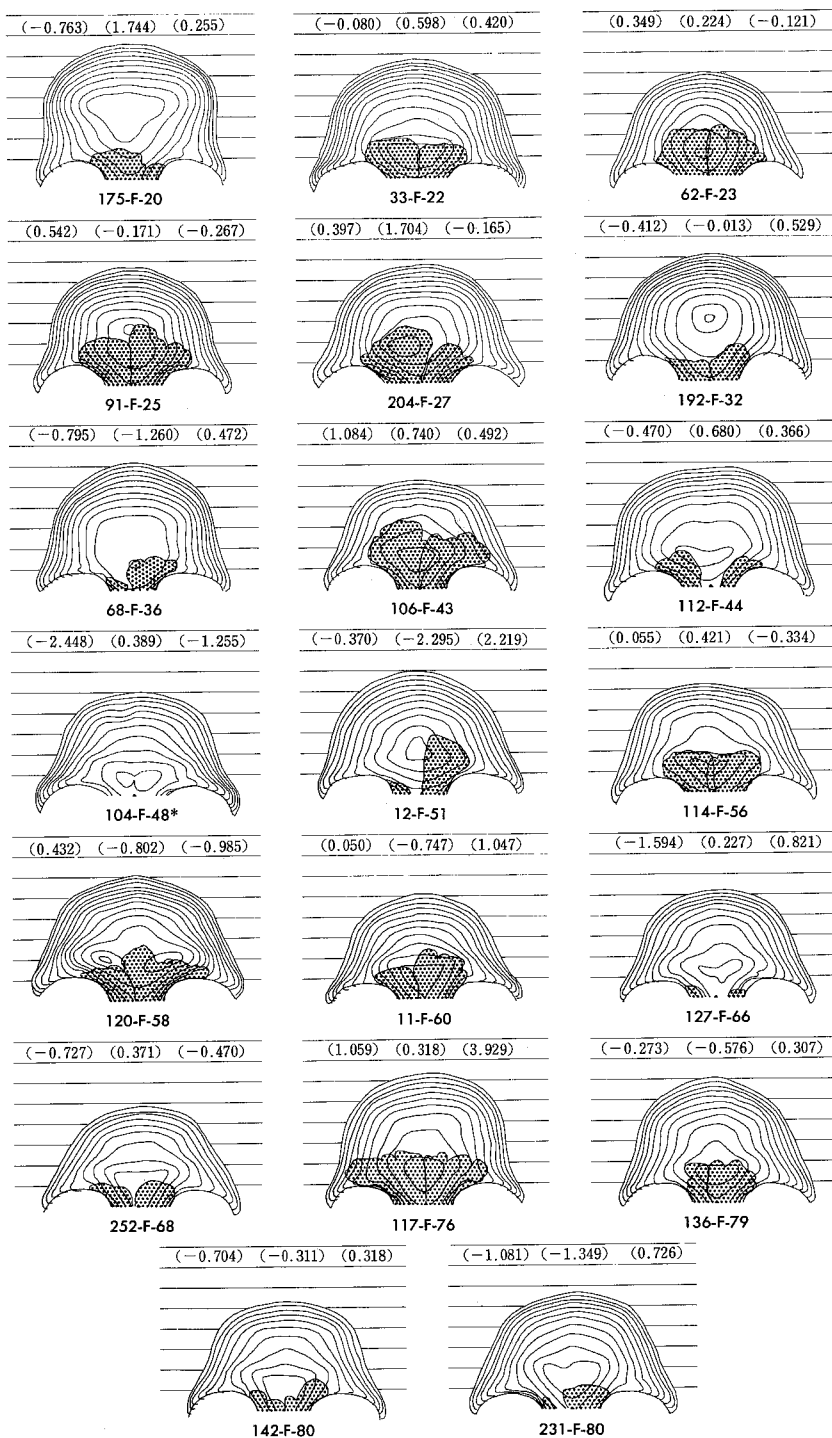


Fig. 12 Superimposed images of the X-ray tracing of the frontal sinus and moiré contour lines on the surface of the frontal squama in females, according to age between 20 and 80. Figures in parentheses indicate the 1st, 2nd and 3rd principal component scores.

Specimen No. -F(=female) or M(=male)-Age.

*: with metopism.

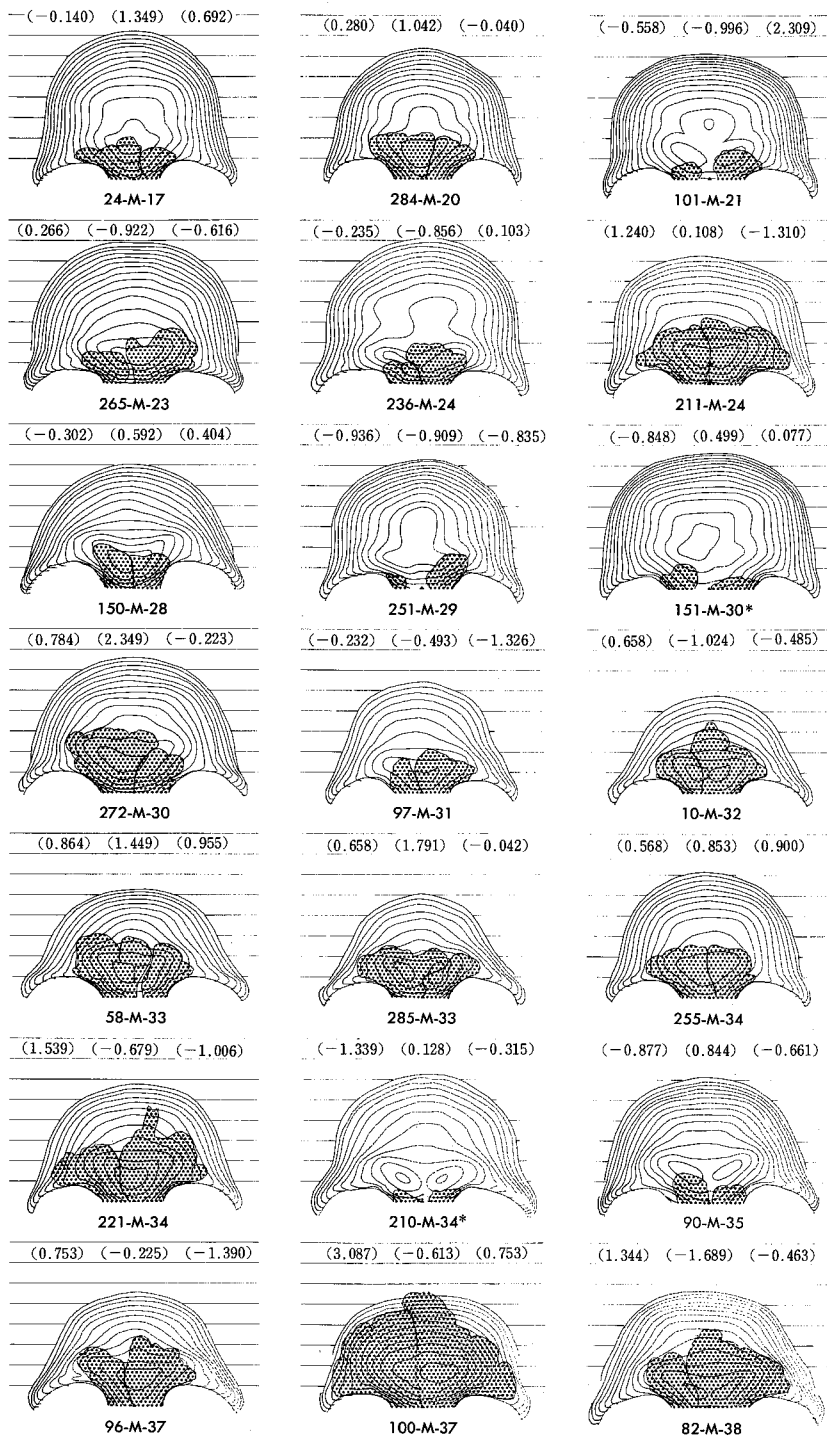


Fig. 13 Superimposed images of the X-ray tracing of the frontal sinus and moiré contour lines on the surface of the frontal squama in males, according to age between 17 and 38.

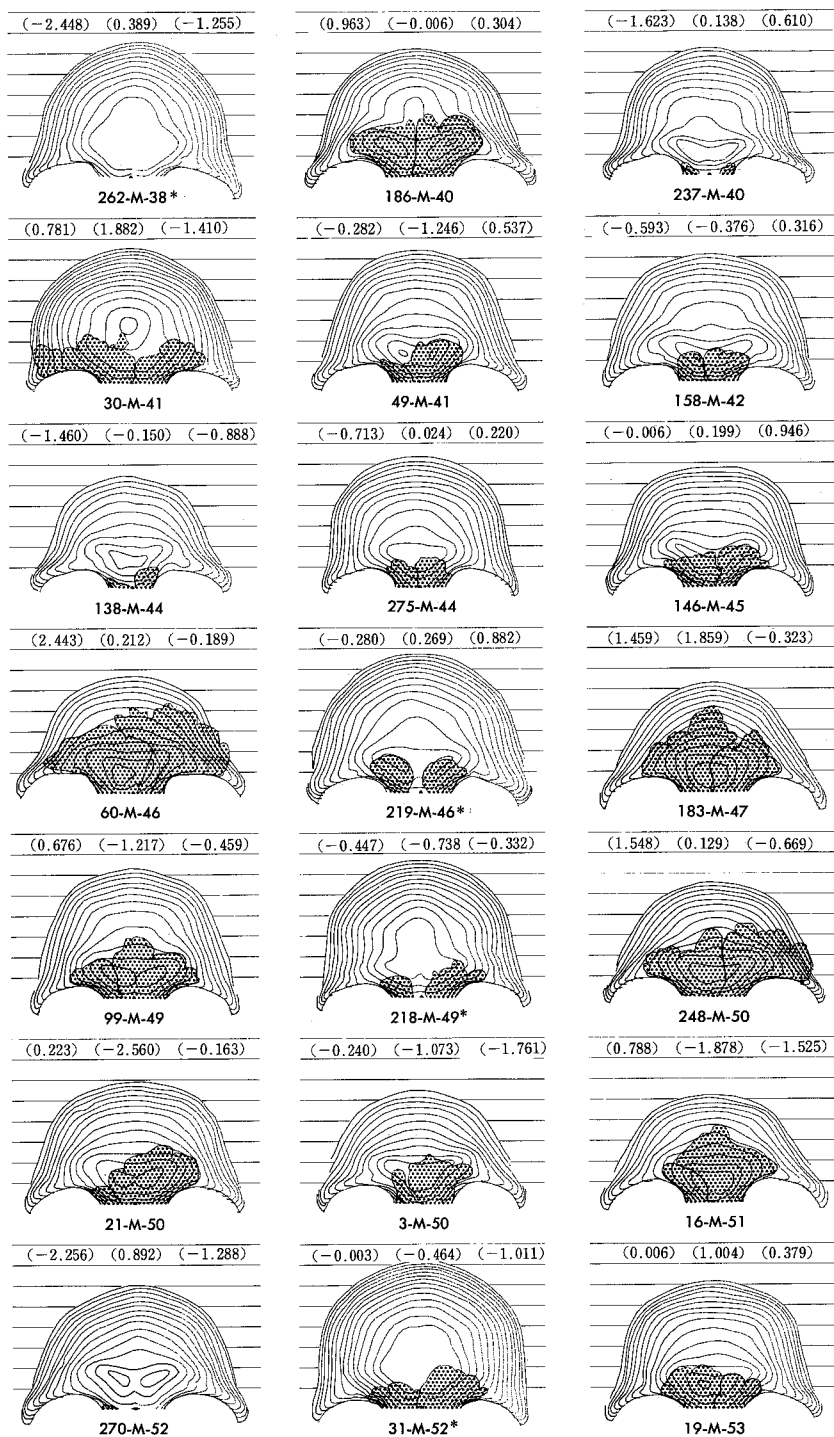


Fig. 14 Superimposed images of the X-ray tracing of the frontal sinus and moiré contour lines on the surface of the frontal squama in males, according to age between 38 and 53.

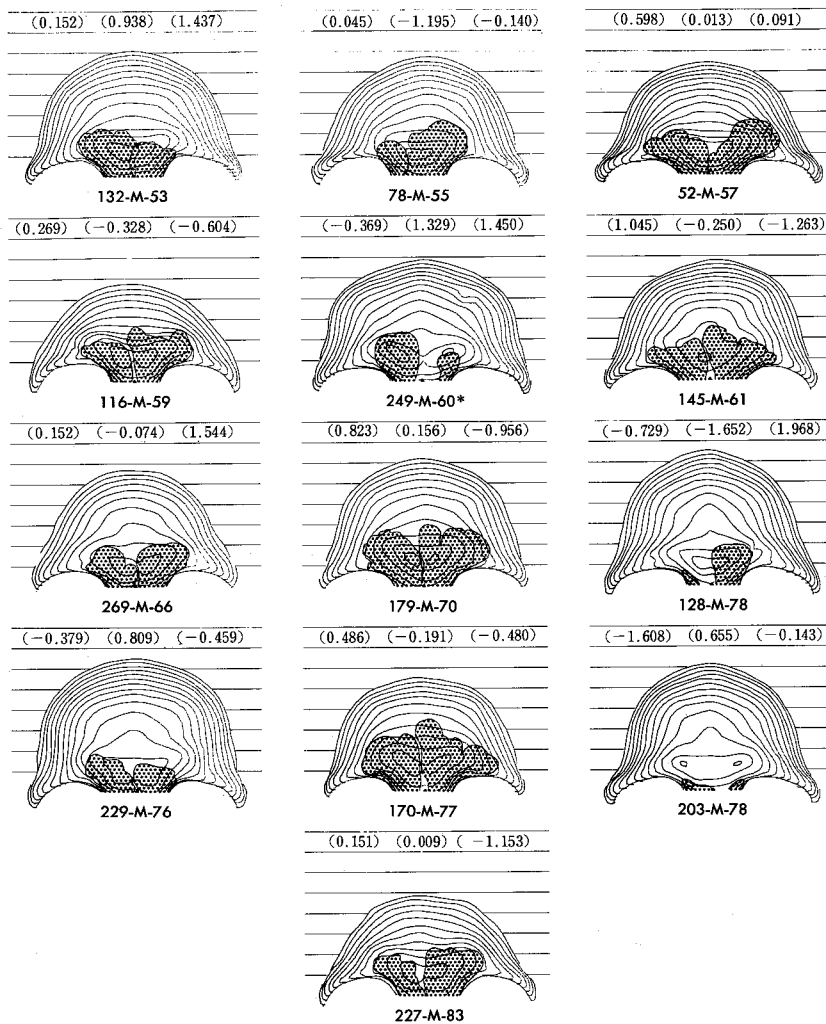
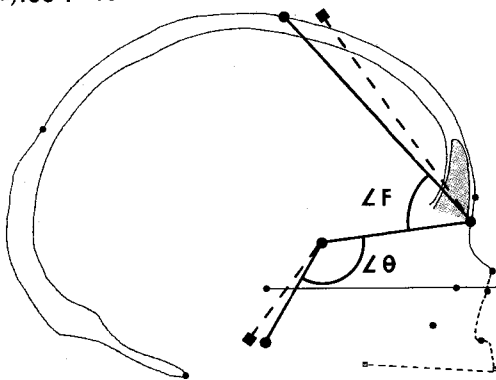
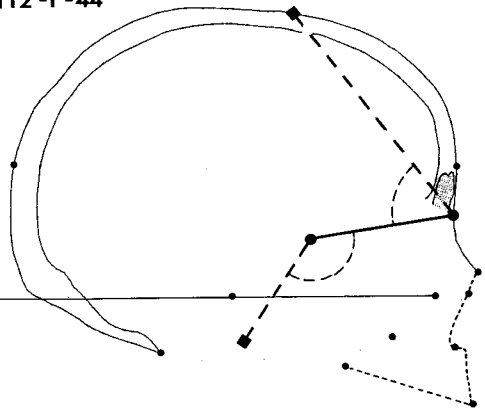


Fig. 15 Superimposed images of the X-ray tracing of the frontal sinus and moiré contour lines on the surface of the frontal squama in males, according to age between 53 and 83.

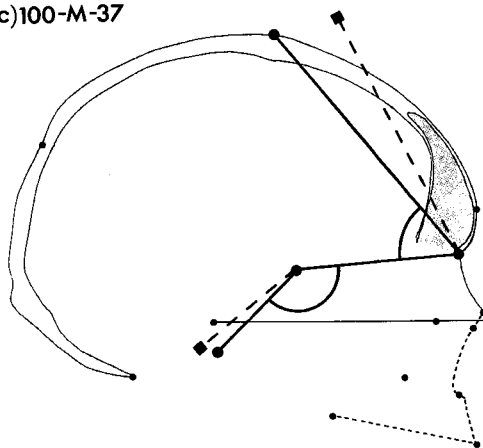
(a)106-F-43



(b)112-F-44



(c)100-M-37



(d)262-M-38

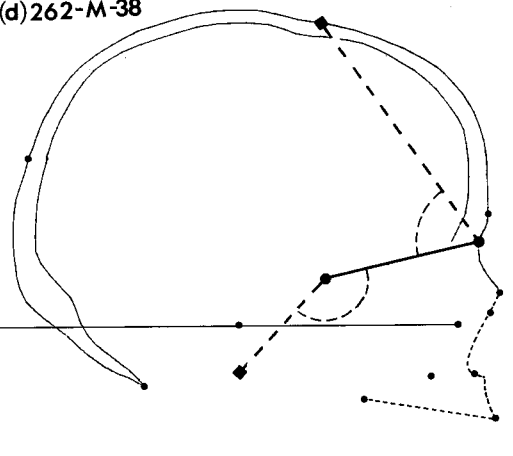


Fig. 16 Exemplification by four cases.

(a) and (c), well-developed sinus; (b) and (d), underdeveloped sinus.

Size of the frontal sinus correlates well with the inclination of the frontal squama (angle-F) and flexion of the cranial base (angle- θ).

5 考 察

5.1 個 体 差

5.1.1 比較解剖学および人類学的意義

副鼻腔の比較解剖学的研究の歴史は古く、Paulli³¹⁾, Weidenreich³²⁾らのすぐれた業績がある。最近本邦でも末永³³⁾は各種哺乳類の比較をもとに含気化機構について論じているが、現在も不明な点が残されている。

ヒト上科についての詳細な研究はCave⁶⁾によってなされ、上顎洞と蝶形骨洞のみを有する“primitive anthropoid ape stock”という共通の祖型から、アジアの類人猿(Gibbon, Orangutan), アフリカの類人猿

(Chimpanzee, Gorilla), そして人類という三つの系統が分化し、それぞれ副鼻腔の形態上の変異によって分けることが可能であるとした。アジアの類人猿では前頭洞が認められず、Gibbonは蝶形骨洞、Orangutanは上顎洞の発育が優勢であり、これに反してアフリカの類人猿と人類では、篩骨洞、前頭洞の発育が顕著であるとした。特に人類では前頭洞の個体変異が特徴的であると述べている。

人類進化の過程における研究としては、Vlček³⁴⁾がネアンデルタール人(旧人)と現世人類(新人)を比較して、人類の進化の過程で前頭洞形態の変異の幅が増大する傾向を認めるとした。ネアンデルタール人の前

頭洞は發育良好で、形状も比較的単純で個体差、左右差も非常に少なく、決して眼窩上隆起を越えて發育することはないのが特徴的であるが、現世人類になると前頭洞の欠如例や、眉弓（旧人の眼窩上隆起に相当する）を越えて前頭鱗の上方へ發育するものまで、個体間の変異幅が拡大しており、さらに左右差も著しいと述べている。

猿人に始まり、原人、旧人を経て新人に至るヒトの進化の大筋は、一般に認められているが、人類進化の過程には不明な点も多く、旧人と新人との連続的な血縁関係も証明されていない。しかし Schultz³⁵⁾は、「変異 (variation) を伴わない進化 (evolution) は考えられず、進化にかかわる形質変化は、個体変異 (individual variation) の形成の中に常に生じている」と述べている。従って著者は、ヒト前頭洞の著しい個体差は進化の過程と密接に関係していると考ええる。

ヒトの進化の過程で最も象徴的要素とされているのは、直立二足歩行、脳頭蓋の増大、大脳の発達、顔面頭蓋の縮小とくに咀嚼器官の弱体化などである。これらの諸要素が互いに複雑に絡み合ったヒトの頭蓋形態は、ヒトの骨格の中でも特に複雑な骨構築を示す。進化の過程での前記諸要素の変化は、頭蓋をめぐる力学的環境の変化を意味しており、頭蓋形質の変化を生体力学的に解釈した研究も多い³⁶⁻⁴¹⁾。

頭蓋底の矢状面は、蝶形骨を中心として、前方は篩骨および前頭骨で構成され、顔面頭蓋と脳頭蓋の骨構築上の境界をなし、両者の発達の違いによってその形態は影響を受ける³⁷⁻³⁹⁾。前方では咀嚼器官からの力学的影響、後方では大後頭孔の前半の両側にある後頭顆で環椎と関節し、頭蓋の荷重を担う重要な部位で、脊椎との関係における頭蓋の力学的バランスと密接に関連するといわれている^{40,41)}。頭底角は下等哺乳類から人類に至る段階的減少を示し³⁸⁾、Weidenreich³⁷⁾は、ヒトの頭蓋底の亀背は現代人が獲得した直立姿勢に対する頭蓋形態の最終的適応の現象であると述べている。

また著者は、Metopism の個体の前頭洞の大きさが、統計的に有意に小さいことを示した。Bolk⁴²⁾によれば、Metopism の前頭部は生体力学的影響が弱い形態を意味するとしている。彼は霊長類の比較解剖学的検討に基づき、側頭筋の付着状態と前頭骨の傾斜や湾曲との関係に相違があり、その結果、前頭骨の骨組織に対する側頭筋の力学的影響に違いが生ずると考えた。すなわち、サルでは前頭が水平に近く Metopism を認めないが、人類は前頭の湾曲が強く傾斜が垂直に近いため、前頭骨正中矢状面での傾斜が側頭筋により生ずる

力の方向と平行になり、骨組織の内部構造に対する力学的影響が弱く、前頭縫合の癒合が起きない個体も出現すると述べている。以上の文献から、前頭洞と脳頭蓋は、ヒトの進化の過程と密接に関連した形態であることは明らかであり、現代人において著者が示した両者の形態上の相関は系統的意味があるばかりでなく、頭蓋の骨構築上で両者の間に生体力学的解釈も成り立つと考える。

5.1.2 遺伝的影響

体重や身長のような量的形質は、微小効果をもつ多数の遺伝子（量遺伝子 polygene）によって支配され、その個体変異は連続したものであり、正規型の分布を示すとされている⁴³⁾。

著者は、現代人の前頭洞形態が著しい個体差を呈してはいても、その大きさは正規分布することを示した。洞の大きさの分布の正規性を、統計的に扱った論文は少ないが、Walander⁴⁴⁾および池田¹⁰⁾らは、著者と同じく洞の大きさは正規分布を示すと報告している。従って、前頭洞の大きさも身長や体重と同じように量遺伝子によって支配されていると考える。そして Schwart⁴⁵⁾や後藤⁴⁶⁾の家系調査、小川⁴⁷⁾の双生児の研究等によっても、前頭洞形態の著しい個体差のかかなりの部分が遺伝的影響によると考えられる。

5.1.3 後天的影響

前頭洞について、小川⁴⁷⁾は一卵生双生児の対偶者間に表現型の相違する例も見られることから、後天的影響もあると述べている。また量遺伝子によって支配される形質は、受精後の体内外の環境変化によって強く影響を受けるとされている⁴³⁾。そこで、どのような環境条件の変化が、前頭洞形態に影響を与えるかということが問題となる。この問題は、前頭洞だけではなく、他の副鼻腔及び乳様蜂巣などの頭蓋に存在する含気腔が、どのような機序で發育するのかという含気化機構の問題と密接に関係する。含気化機構に関する諸説は次の三つに大別できる。含気化の因子が副鼻腔そのものに存在するという説、頭蓋の骨組織に存在するという説、そして副鼻腔や頭蓋などの身体の一部に要因を求めず全身的な影響として含気化に相違があらわれるという説とである。

副鼻腔の側に因子が存在するという説は、更に粘膜説と気圧説に分けることができる。粘膜説は、副鼻腔の粘膜組織自体に能動的な骨吸収作用があり、粘膜の性質によって含気化の程度が決定されるというもので、Paulli³¹⁾が唱えた。また、Wittmaack⁴⁸⁾は、胎生期や生後の副鼻腔粘膜の炎症が含気化を抑制すると主張した。

一方、Schwarz⁴⁵⁾は、粘膜の性質を決定するのは粘膜下結合組織であり、遺伝的素因が支配的であるとした。気圧説はSchumuckerとSitsen⁴⁹⁾が唱え、呼吸に伴う洞内圧の変化が骨海綿質を圧迫破壊すると彼らは考えた。

骨組織自体の側に含気化の因子が存在するという説は、Weidenreich³²⁾やRichter⁵⁰⁾らが唱えた。Weidenreichは比較解剖学ならびに系統発生の検討を行い、副鼻腔は頭蓋の構成骨にかかる静力学的応力に対応して生じた骨構築上の死腔であると述べた³²⁾。

第三の全身的要因が考えられている背景として、諸種の内因性の全身疾患に際して、副鼻腔の形態異常を認めることがあげられる^{13,51-53)}。確かに、全身的に形態異常を呈する内因性疾患では、含気化の異常を認めるが、あくまでも病的状態での現象であり、生理的に存在する前頭洞の著しい個体変異に、全身的要因がどのように関与しているかは、現在のところ全く不明である。

以上のごとく様々な説があるが、現時点では粘膜説や気圧説には反論が多い。後藤⁴⁶⁾は、Wittmaackの粘膜説を否定し、含気化の抑制現象には遺伝的要素が存在し、側頭骨の含気蜂巣の発育抑制が側頭骨自身の発育抑制であることから、副鼻腔でもおそらく構成骨の側に因子が存在すると述べた。寺山⁵⁴⁾は、ヒトの胎児の副鼻腔について組織学的研究を行ない、粘膜説や気圧説を否定した。そして副鼻腔の形態はこれを構成する骨自体の形態により決定され、その発育過程は骨自体の形態獲得過程であり、その発達の間個体差は先天性因子に支配され、生後は構成骨に働く静力学的作用に影響されると推論した。

5.1.4 前頭洞形態の個体差に対する力学的解釈の可能性

比較解剖学あるいは人類学の立場から、現代人の前頭洞形態の個体差が、ヒトの進化の過程でおこった頭蓋をめぐる力学的条件の変化と関係している可能性を文献的に指摘した。しかし、ヒトの進化の過程はまだ解明されておらず、数多くの形態学的傍証にもとづく推論しかできない。そして含気化機構の文献的考察では、含気化の因子は骨組織自体に存在し、骨にかかる力学的要因が関与するという説が有力であることを述べた。しかし、あくまでもWittmaackにはじまる粘膜説にたいする、遺伝学および組織学的反証に基づいた推論である。まして、骨組織の力学的研究は方法論的にも大変むずかしく、特に頭蓋の力学的環境と前頭洞の形態変異の関係を力学的解析によって、直接的に証明した研究は皆無である。ただし、直接的な証明とは

いえないが、人工頭蓋変形の風習は、頭蓋の人為的変形が洞形態にどのような影響があるかを知る上で注目できる。しかし、McNeill⁵⁵⁾による頭蓋底形態との関係や、高橋⁵⁶⁾の鼻中隔湾曲との関係の報告はあるが、前頭洞についての詳しい調査報告を見ない。ただVlček³⁴⁾は、わずか4例の変形頭蓋についてではあるが、前頭骨のグラベラ部分への圧力によって、洞が拡大する傾向があると述べているし、Ossenberg⁵⁷⁾は変形頭蓋の前頭骨は骨形成不全的(hypostotic)な状態を示すとしており、変形頭蓋をめぐる今後の研究を期待したい。

骨構築の力学的解釈は、骨格あるいは筋肉についての物理的および幾何学的データと力学の法則とを組み合わせたモデル実験によって、初めて可能となる。

全身の骨格の中でも、四肢骨の形態とそれをめぐる力学的条件との関係は、比較的モデル化が容易である。とくにWolff⁵⁸⁾が「骨の機能の変化が起ると、内部構造にも一定の変化を生じ、しかもその形態変化は力学的法則に一致する」という、所謂Wolffの応変則を発表して以来、四肢骨については多くの報告を見る。最近、上尾⁵⁹⁾は、変形性股関節症において大腿骨頭に生ずる骨嚢包の生体力学的解析を行ない、形成された嚢包が生体力学的に変形した骨頭を強化する作用のあることをコンピュータシミュレーションで明らかにした。大腿骨頭の嚢包は、中空あるいは柔らかい組織を含み、周囲は硬化した骨壁である。骨嚢包が病的状態で形成されるとはいえ、骨構築上の空洞という点では、前頭洞も骨嚢包と同じであり、前頭洞の力学的解釈の可能性という観点からは、注目すべき研究と考える。

一方、頭蓋については、幾何学的構造や力学的条件の設定が単純ではなく、力学モデルにもとづく研究は少ない。Endo⁶⁰⁾は、ヒトとゴリラの顔面頭蓋の骨表面に抵抗線歪計を装着し、側頭筋と咬筋の筋繊維の走行に一致させたキャンパスを接着して直接歯牙荷重を加えて力学的解析を行なった。その結果、前頭部、特にその正中部は、咀嚼器官によって生じたほぼ垂直方向に変形を起す曲げのモーメントの影響を受け、鼻柱から上に向かう圧縮力と、両側の前頭骨側面と頬骨に対する咀嚼筋による下方へ向かう引張力によって、非常に複雑な曲げ応力の合成がなされるとした。そして、もし前頭部が垂直であれば、曲げのモーメントに対して前頭部全体で対抗できるが、傾斜した前頭ではその下部のみで対抗することになるために、眉間や眉弓の隆起のような補強材料が必要であると述べた。著者の研究結果では、傾斜の強い前頭骨で洞の発達が良いことを示した。遠藤のモデル実験は、前頭骨と顔面頭蓋の

骨表面での静力学的な歪みを検討したものであるが、当然骨の内部構造の力学的対応も反映しているわけであり、前頭洞が眉間や眉弓と同じく力学的補強構造である可能性を示唆すると考える。しかし彼は、前頭骨表面の応力分布と骨内部に存在する前頭洞との力学的関係には触れていない。

また、脳頭蓋全体の形態を力学的に解釈するためには、咀嚼筋だけの条件で充分ではない。Washburn⁶¹⁾は、ラットを使って、項筋と側頭筋を切断した状態で飼育し、頭蓋の発育形態への影響を調べた。動物実験ではあるが、側頭筋だけを切断した場合には、頭蓋の縫合が単純になるだけであるが、同時に項筋も切断すれば、脳頭蓋の変形が起ると述べた。Duterloo and Enlow⁶²⁾も姿勢と下顎の突出度と脳実質自体の三つの要素によって頭蓋は骨改築を受けるとしている。このように姿勢による頭蓋の力学的バランスも重要な条件の一つであると考える。

前頭洞は前頭骨の Diploë に存在する、骨の内部構造であり、洞形態の力学的解析のためには新たなモデルと解析手段を必要とし、今後の課題と考える。ただ、前頭洞の大きさが前頭骨のみならず脳頭蓋全体の幾何学的データによって説明できるという著者の結果から考えると、遠藤のモデルにさらに脊椎との関係での頭蓋の力学的バランスや、前頭傾斜角や蝶形骨角を始めとする脳頭蓋の幾何学的条件を加え、しかも前頭洞という頭蓋骨内部の構造について力学的解析を行う必要があると考える。

5.2 左 右 差

国友⁶³⁾は日本人 33 例中 60% の例で左側の前頭洞発育が良好であることに注目し、欧米での調査例でも同じ傾向を認めるとして、人種のいかに問わず左側の洞が大きいと述べた。本多⁶⁴⁾、Marciniak and Nizankowski⁶⁵⁾、Pobornikova⁶⁾、Walander⁴⁴⁾らもやはり左側洞の発育が良いと述べた。著者の結果も左側洞が有意に大きく、国友が考えたように人種の違いによらず左側洞の発育が良好である可能性は多い。一方、集団の差によって異なった結果の報告もある^{7,10)}。小川⁴⁷⁾は、左右差のある前頭洞を持つ双生児の対偶者間で、鏡像現象を認める例があることから、片側性の洞発育抑制は外因によるとは考えられず、遺伝形質の不均衡配分によると考えた。確かに左右差の問題は、遺伝的影響も充分に考慮する必要がある、集団間で相違があるかもしれない。しかし、平均値での左右差の有無ということよりは、著者の主成分分析の結果から、洞の高径、幅径、面積は同一側同志が一体となって変動す

ることは明らかであり、左右それぞれが独立した発育形態を示す要素があるということの方が、むしろ重要と考える。

一方、Trinkaus⁶⁶⁾は頭蓋の non-metric traits の非対称性には環境要因、特に biomechanical stress も重要な影響があると述べている。前頭洞についても左右差を引き起こすような biomechanical stress が存在する可能性もある。そこで著者は、左右の洞とはほぼ一致して存在する眉弓や眉間の隆起が、前頭骨に対する咀嚼器官からの力学的影響に対応のある骨形態とされていることに注目し、前頭鱗外面三次元形状の左右の歪みと洞の左右差との関係を検討した。その結果、前頭鱗表面はかなりの対称性を示し、その内部に存在する洞の左右差に対応する程の非対称を見出せなかった。しかしこの結果から直ちに、洞の左右差にたいする力学的影響を否定することはできない。つまり、前頭洞は骨の内部構造であり、力学的影響に対しては、眉弓や眉弓の隆起などの前頭骨外板の表面構造とは異なる骨改築の様相を呈する可能性もある。

また、顎関節に加わる咀嚼圧は著しい個体差があり、一側のみで噛む癖のある人は、反対側に比べて大きな咬合力を示すといわれており^{67,68)}、咀嚼器官による biomechanical stress は、洞の個体差にも左右差にも関与している可能性がある。従って今後、側頭線をはじめとして、上顎や下顎などの頭蓋形態の中から、咬合力の左右差や個体差と対応し得る形質を検索し、洞の左右差との関係を検討する必要があると考える。

5.3 前頭鱗外面形状と前頭洞

著者は、前頭鱗外面のモアレ縞写真と前頭洞正面 X 線像との合成画像を作成し、前頭鱗外面形状のなかでも特に眉間や眉弓と前頭洞との関係を検討した。

人類の眼窩の上部は眉間の隆起、眉弓、眼窩上縁そして眼窩上三角に分けられる。Gorilla, Chimpanzee, 猿人, 原人, 旧人では各部が強く隆起して一体となり、眼窩上隆起といわれる。そして眼窩上隆起は、人類進化の過程でまず眼窩上溝の出現により二分され、その後次第に外側部より消退し現代人では前記の各部に分かれる。類人猿のなかでも Gorilla は特に強大な眼窩上隆起を認めるが、Orangutan や Gibbon はこれを欠き、前頭洞の存否と平行関係を認める。また現代人でも、オーストラリア原住民は眼窩上縁部と眉弓が癒合して強く隆起し、眼窩上溝も認める。このように系統的な差異や人種差の他に、小児や女性に比べて成人の男性では眉間および眉弓の隆起がより強く、性差や年齢差が存在する。そして、眉間や眉弓の隆起や眼窩上隆起

は、咀嚼器官によって頭蓋に生ずる応力を分散し、吸収するといわれている^{60,66,69,70}。

前頭洞が発育している場合には、眉間及び眉弓は洞前壁を形成する前頭骨外板の表面形態ということになる。そこで、洞の発達に眉間や眉弓の隆起によって、原因的現象なのか、それともたんに二次的現象なのかということが問題となる。この問題については、現在も明確にされていない⁷¹。前頭洞の発育と眉間や眉弓の隆起との形態上の関係は否定的な意見が多い^{17,18,70}。しかし、Vlček³⁴や Trinkaus⁶⁶は、眉間や眉弓の隆起によって、骨の海绵質が増大していれば、それはむしろ前頭洞の発育にとって好ましい状態が成立し、二次的な現象であると述べている。著者のモアレ縞画像による研究結果からも、両者の形態は一定の関係を示さず、眉間や眉弓の隆起によって、前頭洞の発育は二次的現象のようであるが、今後さらに検討を要すると考える。

5.4 モアレ縞写真について

モアレ縞写真は物体表面の複雑な三次元情報を一枚の写真で十分に記述でき、しかも内部のX線像との合成画像を作成すれば、極めて有効な形態観察の手法となることを本研究で示した。

従来、眉間や眉弓形態観察の方法には、CunninghamやBrocaの型分類がある²¹。しかし、従来の方法は人類学上の集団比較には有効であるが、個体差や左右差などの集団内比較を行うには客観的な計量的方法を必要とする。そこで著者はモアレ縞を利用する方法で、前頭鱗外板の複雑な三次元形態の客観的記載を試みた。

モアレ縞画像は、複雑な起伏を呈する物体表面の三次元情報を二次元情報に変換し、全体のパターンを視覚的にとらえることができる。最近になり、頭蓋計測の分野での応用例も報告されている⁷²⁻⁷⁶。中でも、早速⁷⁵は前頭部の性差、年齢差をモアレ写真によって比較検討し、その有効性を報告している。

一方、藤崎ら⁷²、Kanazawa⁷⁴も述べているように、撮影時の被写体の基準位置は研究の目的に応じて慎重に定めねばならない。本研究では、特に前頭鱗表面形状の左右差を観察することに主眼をおき、その為の基準面として両側fmaを含んだ平面を設定し、成果を得ることができた。しかし、個体差を検討する立場で前頭鱗の傾きと洞形態との関係を明らかにするには、その基準面として耳眼平面が有効であるとは限らない。すなわち、側面X線写真の解析の結果では、角度の計測項目の中で洞の大きさと最も高い相関を示した計測の基準は耳眼平面ではなく、すべてナジオンとスフェノ

イダーレを結ぶいわば前頭蓋底を示す線であった。したがってFig. 12~15に示すモアレ画像は、あくまでも耳眼平面を基準面とした情報であることに留意して、いたずらに表面積、体積その他の数値情報を求めることなく、さらに有効な情報の抽出と解析方法について今後も検討する必要がある。

5.5 文献的考察のまとめと問題点

この研究は現代人についての調査研究であり、前頭洞および脳頭蓋の両者の形態計測値の間に、あくまでも統計学的な相関を証明したに過ぎない。そして文献考察によって、ヒトの進化という重要な問題が複雑に絡み合い、その結果が前頭洞と脳頭蓋の形態上の相関関係として現れていると考えた。さらに、個体差をはじめとした前頭洞の形態上の諸種の変異は、咀嚼器官によってもたらされるbiomechanical stress、直立歩行の獲得と密接に関連する力学的バランスなどの、頭蓋にかかる力学的環境に対応した骨組織の改築の結果であると推論された。

一方、生物進化の過程を考慮する立場から、人の骨格はまだ十分に完成されたものではないために、理想とする形態と機能の一致は必ずしも達成されてはいないと考えられている^{77,78}。従って、骨内部の構造を力学的に単純に評価することは危険かもしれない。しかし、ヒトの進化の過程を十分に考慮して、現代人の頭蓋形態の力学的条件を検討することは重要な課題と考える。そして、著者の明らかにした前頭洞の大きさと相関を示す脳頭蓋計測値が、頭蓋の骨構築の力学的解析にとって、重要な幾何学的データとなり得る。

著者の結果では、前頭洞の大きさは頭蓋の形と関連した形質であり、特に前頭の傾斜や蝶形骨角、頭蓋の厚さ、頭長高示数などに相違が見られる集団間では前頭洞の発育程度に差を認める可能性がある。Hylander⁹は、ユスキモーでは前頭洞が小さく、しかも鉛直的な前頭部を呈し、眉弓の発達も弱く、前頭蓋底が長い傾向にあるとした。そして、洞の大きさと頭蓋の形の構築上の相関があるかもしれないと述べている。従って、前頭洞の形態による集団比較を行なう場合には、洞の大きさの計測だけではなく、殊に頭蓋の形を表現する計測項目を同時に検討すべきと考える。

また前頭洞の欠損例は確かに存在するが、著者の研究から、前頭洞の欠損例を含めても、洞の大きさは脳頭蓋の形態によってかなり予測できた。しかも前頭洞は胎生期には認められず、生後の様々な環境要因に影響される可能性があり、前頭洞の欠損は、集団比較に応用される血液型などの質的な遺伝形質とは区別され

る現象と考える。従って、洞穴損率による集団比較のように質的形質として扱うことは不適切であり、前頭洞形態だけで集団比較を行う場合には慎重な態度を要する。しかし、この研究の結果から、前頭洞の大きさの形態計測を行えば、複雑でしかも数値化の難しい脳頭蓋形態の複合した情報が得られると解釈でき、洞形態は人類学上の有用な量的形質といえる。これは特記すべきことと考える。

現在、副鼻腔の生理的機能については、多くの説が考えられているが、一定の見解に達していない^{12,82,83)}。その中でも、Weidenreich³⁶⁾は副鼻腔が頭蓋の骨構築上の死腔であり、機能がなとしている。しかし、著者は前頭洞形態が、頭蓋全体の骨構築との関係において力学的に解釈できる構造であると推論し、むしろ生体力学的に積極的な機能を持つ構造と考える。また、前頭洞が力学的構造であるからといって、副鼻腔粘膜の生理的作用^{79,80)}が否定されるものでないことはいうまでもない。

また、前頭洞は結合織性骨化した前頭骨に发育し、ヒトでは胎生期の发育をみない点で、明らかに上顎洞とは異なるし、末永³⁹⁾は含気化機構について比較解剖学的立場から、上顎洞を“間隙型”、前頭洞を“吸収型”として区別している。従って、前頭洞と他の副鼻腔を同一次元として論ずることは危険かもしれない。

今後の問題としては、前頭洞の力学的解析のモデルを設定するために、脳頭蓋だけではなく顔面頭蓋との形態上の関係を調査し、上尾ら⁵⁹⁾が用いたコンピュータシミュレーションなどの方法によって、左右差の問題や他の副鼻腔をも含めて前頭洞の力学的機能の有無を検討する必要があると考える。

6 結 語

ヒト前頭洞と脳頭蓋のX線形態計測および前頭鱗外面のモアレ縞写真撮影を行ない、マイクロコンピュータによる画像合成と多変量解析によって、ヒト前頭洞の個体的変異の実態と、脳頭蓋との形態上の相関について検討した。

- 1) 前頭洞の高径、幅径、深さ、面積の平方根は正規分布することを統計学的に明らかにした。
- 2) 洞計測値の平均値について、t検定を行なった。
 - ① 左側は右側より有意に大きい。
 - ② 男性では女性より大きい傾向を示すが、有意な性差は認めない。
 - ③ 有意な年齢差を認めない。
 - ④ 前頭縫合遺残例は非遺残例に比べて、平均値で

は有意に小さい洞であるが、統計学的異常値を示す頻度は必ずしも高いとはいえない。

- 3) 主成分分析により、前頭洞形態の特徴を互いに無相関な三つの主成分で要約した。
 - ① 第一主成分は、洞全体の大きさの因子であり、洞の大きさの著しい個体差が第一の特徴である。
 - ② 第二主成分は、洞の左右差の程度を意味する因子である。
 - ③ 第三主成分は、洞の深さを意味する因子と解釈できる。
- 4) 相関分析により、前頭洞の「大きさ」は、脳頭蓋の「形」と有意な相関を示した。
 - ① 正準相関分析によって、前頭洞の大きさは、脳頭蓋の幾何学的データによって予測可能であることを示した。
 - ② 洞の大きさは前頭骨の傾斜角、蝶形骨角と負の相関を示し、前頭骨および蝶形骨の厚さと正の相関を認め、人類学的計測の立場から注目した。
 - ③ 前頭洞と脳頭蓋の形態上の相関関係は、性差、年齢差、前頭縫合遺残の有無で影響を受けない。
- 5) 前頭鱗外面モアレ縞写真と前頭洞正面X線像の合成画像を作成し、両者の関係を客観的に記載した。
 - ① 眉弓や眉間の形状と洞の发育程度とは、一定の関係を示さない。
 - ② 前頭鱗外面の形状は、洞の左右差に比べて、三次元的にかなりの対称性を示した。
- 6) 文献考察により、以下の推論を行なった。
 - ① 人類進化の過程で生じた直立歩行による頭蓋の位置変化と咀嚼器官の弱体化にともなう、頭蓋の骨組織の生体力学的条件の変化が、前頭洞の形態変異と密接に関係している可能性を指摘した。
 - ② 前頭洞の個体的変異および、脳頭蓋との相関に対する生体力学的解釈の可能性を示唆した。
 - ③ 前頭洞の生物学的存在意義として、咀嚼器官および頭蓋全体からの前頭部への応力集中を緩和する働きがあると推論した。

稿を終るにあたり、御校閲いただいた本学解剖学第一講座高橋杏三教授、耳鼻咽喉科学講座形浦昭克教授、公衆衛生学講座三宅浩次教授、ならびに旭川医科大学耳鼻咽喉科学講座海野徳二教授に深甚なる謝意を表します。また、始終懇切なる御助言をいただいた本講座の百々幸雄助教授に深謝いたしますとともに、教室員各位の御協力に感謝いたします。

なお本論文の一部は、1982年10月9日、日本解剖

学会第28回東北・北海道連合地方会において発表した。

文 献

- 吉岡栄樹：日本人胎児における副鼻腔の発生学的研究。解剖誌 **12**, 504-582 (1938)。
- 寺山吉彦：人胎児副鼻腔の形態的発育。耳鼻臨床 **47**, 440-444 (1954)。
- 伊藤俊昭：組織学的にみた人前頭洞の気胞化とその臨床的意義。耳展 **14**, 507-557 (1971)。
- Szilvássy, J.: Zur Entwicklung der Stirnhöhlen. *Anthrop. Anz.* **39**, 138-149 (1981)。
- Pobornikova, S.: An X-ray investigation of the development of the frontal sinuses in children. *Folia Med. (Plovdiv)* **16**, 213-220 (1974)。
- Cave, A. J. E. and Haines, R. W.: The paranasal sinuses of the anthropoid apes. *J. Anat.* **74**, 493-523 (1940)。
- Brothwell, D. R., Molleson, T. and Metrewell, C.: Radiological aspects of normal variation in earlier skeletons: An exploratory study. In Brothwell, D. R. (ed.): *The Skeletal biology of earlier human populations*. 1st ed. 149-172. Pergamon (1968)。
- Hanson, C. L. and Owsley D. W.: Frontal sinus size in Eskimo populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* **53**, 251-255 (1980)。
- Hylander, W.: The adaptive significance of Eskimo craniofacial morphology. In Dahlberg, A. A. and Graber, T. M. (ed.): *Orofacial growth and development*. 129-169. Mouton (1977)。
- 池田次郎：前頭洞計測値の集団間変異。人類誌 **90** (別号), 91-104 (1982)。
- Koertvelessy, T.: Relationships between the frontal sinus and climatic conditions: A skeletal approach to cold adaptation. *Am. J. Phys. Anthropol.* **37**, 161-172 (1972)。
- Blanton, P. L. and Biggs N. L.: Eighteen hundred years of controversy. The paranasal sinus. *Am. J. Anat.* **124**, 135-148 (1969)。
- Schuller, A.: Note on the identification of skulls by X-ray pictures of the frontal sinuses. *Med. J. Aust.* **1**, 554-556 (1934)。
- 千葉幹一：前頭洞と頭蓋外形との関係。(第一報) 晒浄頭蓋骨の間接撮影法。慈恵医解剖業績集 **5**, 1-16 (1951)。
- Turner, A. L. and Poter, W. G.: The structural type of the mastoid process, based upon the skiagraphic examination of one thousand crania of various race of mankind. *J. Laryngol. Otol.* **37**, 115-121, 161-175 (1922)。
- Gulisano, M., Pacini, P., Orlandini, G. E. and Colosi, G.: Considerazioni anatomo-radiologiche sui senifrontali: ricerca statistica su 520 casi umani. *Arch. Ital. Anat. e Embriol.* **83**, 9-32 (1978)。
- Romanes, G. J.: *Cunningham's Textbook of Anatomy*. 12th ed. Oxford Univ. (1981)。
- Williams, P. L. and Warwick, R.: *Gray's Anatomy*. 36th ed. Cambridge Univ. (1980)。
- Howells, W. W.: *Cranial variation in man*. Harvard Univ. (1973)。
- 名和田宏：臨床神経学的エックス線頭蓋計測について。(I)。脳神経 **15**, 385-398 (1963)。
- Martin, R. and Saller, K.: *Lehrbuch der Anthropologie*. II. Gustav Fisher Verlag. Stuttgart (1959)。
- Theocaris, P. S.: *Moiré fringes in strain analysis*. Pergamon (1969)。
- Takasaki, H.: Moiré topography.: a) — *Appl. Opt.* **9**, 1457-1472 (1970). b) — *Appl. Opt.* **12**, 845-850 (1973)。
- 鈴木正根・金谷元徳・鈴木喜義：モアレ縞による三次元計測。精密機械 **40**, 746-753 (1974)。
- Kanazawa, E. and Ikeda, N.: Perspective correction of the moiré photograph. *J. Biol. Photo. Assoc.* **47**, 107-109 (1979)。
- 岸根卓郎：理論応用統計学。397-399. 養賢堂 (1980)。
- 芳賀敏郎・橋本茂司：回帰分析と主成分分析。218-226. 日科技連出版社 (1981)。
- Cooly, W. W. and Lohnes, P. R.: *Multivariate data analysis*. John Wiley & Sons (1971)。井口晴弘他共訳：行動科学のための多変量解析。173-207. 鹿島出版会 (1973)。
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉盧 正：多変量解析法。日科技連出版会 (1981)。
- 芝 祐順：行動科学における相関分析法(第2版)。東京大学出版会 (1980)。
- Paulli, S.: Über die Pneumaticität des Schädels bei den Säugetieren. *Morphol. Jahrb.* **28**, 147-251, 483-564 (1900)。
- Weidenreich, F.: Über die pneumatischen Nebenräume des Kopfes. *Anat. u. Entw.* **72**, 55-93 (1923)。
- 末永義圓：副鼻腔の比較解剖学的研究—とくに含気化機構について。解剖誌 **55**, 551-572 (1980)。
- Vlček, E.: Die Sinus frontales bei europäischen Neanderthalern. *Anthrop. Anz.* **30**, 166-189 (1967)。
- Schultz, A. H.: *Variations in man and their*

- evolutionary significance. *Am. Naturalist* **60**, 297-323 (1926).
36. Weidenreich, F.: The brain and its role in the phylogenetic transformation of the human skull. *Tr. Amer. Phil. Soc. (N. S.)* **31**, 321-442 (1941).
 37. Weidenreich, F.: Some particulars of skull and brain of early hominids and their bearing on the problem of the relationship between man and anthropoids. *Am. J. Phys. Anthrop.* **5** (N. S.), 387-427 (1947).
 38. Scott, J. H.: The cranial base. *Am. J. Phys. Anthrop.* **16**, 319-348 (1958).
 39. Duterloo, H. S. and Enlow, D. H.: A comparative study of cranial growth in homo and macaca. *Am. J. Anat.* **127**, 357-368 (1970).
 40. Schultz, A. H.: Conditions for balancing the head in primates. *Am. J. Phys. Anthrop.* **29**, 483-497 (1942).
 41. Adams, L. M. and Moore, W. J.: A biomechanical appraisal of some skeletal features associated with head balance and posture in the Hominoidea. *Acta Anat.* **92**, 580-594 (1975).
 42. Bolk, L.: Über Metopismus. *Z. Morph. Anthrop.* **21**, 209-226 (1919-1921).
 43. 木村資生(編): ヒト遺伝の基礎. 岩波書店(1975).
 44. Walander, A.: Considerations of variations of frontal sinuses. *Acta Oto-laryngol.* **60**, 15-22 (1965).
 45. Schwarz, M.: Die Bedeutung der hereditären Analoge für die Pneumatization der Warzenfortsätze und die Nasennebenhöhlen. *Arch. Ohr- usw. Heilk.* **123**, 161-232 (1929).
 46. 後藤敏郎: Pneumatisationの成立とその臨床. *日耳鼻* **56**, 1028-1049 (1953).
 47. 小川茂晃: 双生児における含気蜂巢の研究. *日耳鼻* **63**, 16-31 (1960).
 48. Wittmaack, K.: Über die normale und pathologische Pneumatisation des Schläfenbeins. *Jena: Gustav Fischer* (1918).
 49. Sitsen, A. E.: Bau und Entwicklung der Stirnhöhlen. *Arch. Ohr- usw. Heilk.* **140**, 79-100 (1935).
 50. Richter, S.: Eine Beitrag zur Entwicklung der Stirnhöhlen nach Beobachtung an Röntgenbildern. *Z. f. HNO.* **23**, 487-506 (1929).
 51. Bersnfeld, K.: Neue Gesichtspunkte zur pneumatisationslehre der Nasennebenhöhlen. *Practica Oto-rhino-laryngologica* **2**, 276-286 (1939).
 52. Torgersen, J.: The frontal sinuses in bronchiectasis. *Acta Radiol.* **32**, 185-192 (1949).
 53. 志賀逸夫・西岡清春: 頭蓋骨 Dysplasia の X 線像. *小児科診療* **38**, 1265-1275 (1975).
 54. 寺山吉彦: 副鼻腔成立過程の胎生組織学的考察. *耳鼻臨床* **48**, 107-111 (1954).
 55. McNeill, R. W. and Newton, G. N.: Cranial base morphology in association with intentional cranial vault deformation. *Am. J. Phys. Anthrop.* **23**, 241-254 (1965).
 56. 高橋 良・森山 寛・吉見充徳・浜田雅之: 人工変形頭蓋—頭蓋形態と鼻中隔彎曲との関係. *耳展* **19**, 417-426 (1976).
 57. Ossenberg, N. S.: The influence of artificial cranial deformation on discontinuous morphological traits. *Am. J. Phys. Anthrop.* **33**, 357-372 (1970).
 58. Wolff, J.: Die Lehre von funktionellen Knochengestalt. *Virchow Arch.* **155**, 256-315 (1889).
 59. 上尾豊二・中村孝志・奥村秀雄・山室隆夫・堤 定美: 変股症骨嚢包の生体力学的解析. *臨整外* **18**, 1239-1248 (1983).
 60. Endo, B.: Experimental studies on the mechanical significance of the form of the human facial skeleton. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. V (Anthrop.)* **3**, 1-106 (1966).
 61. Washburn, S. L.: The relation of the temporal muscle to the form of the skull. *Anat. Rec.* **99**, 239-248 (1947).
 62. Duterloo, H. and Enlow, D. H.: A comparative study of cranial growth in homo and macaca. *Am. J. Anat.* **127**, 357-368 (1970).
 63. 国友 鼎: 前頭洞について. *東京医会誌* **21**, 633-647 (1907).
 64. 本多 稔: 本邦人前頭洞のレントゲン線的考察. *日本レントゲン会誌* **6**, 2304-2316 (1928).
 65. Marciniak, R. and Nizankowski, G.: Metopism and its correlation with development of frontal sinuses. *Acta Radiol.* **51**, 343-352 (1959).
 66. Trinkaus, E.: A reconsideration of the Fontechevide fossils. *Am. J. Phys. Anthrop.* **39**, 25-36 (1973).
 67. Joachin Molitor: Untersuchungen über die Beanspruchung des Kiefergelenks. *Z. Anat. Entwickl. Gesch.* **128**, 109-140 (1969).
 68. 藤田邦彦: 咬合力に関する研究. *九州歯会誌* **26**, 113-123 (1972).
 69. Weimann, J. and Sicher, H. ed.: Bone and bones. 2nd. ed. Mosby (1955).
 70. Toldt, C.: Brauenwulste, Tori supraorbitales und Brauenbogen, Arcus superciliares, und die mechanische Bedeutung. *Mitteilungen der Anthrop. Gesellschaft in Wien* **44**, 235-315 (1914).
 71. Smith, F. H. and Ranyard, G. C.: Evolution of the supraorbital region in upper Pleistocene fossil

- hominids from South-central Europe. *Am. J. Phys. Anthrop.* **53**, 589-610 (1980).
72. 藤崎年英・寺田春水・池田敏子：電算機による骨格モアレ縞の画像処理システム. *人類誌* **90**, 161-168 (1982).
73. Terada, H. and Kanazawa, E.: The position of Euryon on the human skull analyzed three-dimensionally by moiré contourography. *J. Anthrop. Soc. Nippon* **82**, 10-19 (1974).
74. Kanazawa, E.: A three-dimensional measurement of the human parietal curvature. *Anat. Anz.* **146**, 364-376 (1979).
75. 早速晴邦：等高線モアレ縞による頭蓋前頭部の研究. *慈医誌* **95**, 569-583 (1980).
76. Takayama, H.: An examination of photographic measurement in craniology. *J. Anthrop. Soc. Nippon* **88**, 249-268 (1980).
77. Hrdlička, A.: Ear exostoses. *Smithsonian miscellaneous collections* **93**, 1-98 (1935).
78. Grunewald, T.: Über Beanspruchungsdeformitäten. *Z. f. Orthop. Ch.* **28**, 449-508 (1918).
79. 織方知三郎：副鼻腔の存在意義について. *総合臨床* **3**, 443-445 (1954).
80. 佐藤良暢・川本 智：副鼻腔の生理的側面—ムコ物質の生化学を中心として. *耳喉* **42**, 523-528 (1970).

別刷請求先：

(〒 060) 札幌市中央区南 1 条西 17 丁目

札幌医科大学解剖学第 2 講座 小野寺 哲